



UFRJ

Ana Paula Pires Coura

**ANÁLISE DE FÁCIES DA FORMAÇÃO MARACANGALHA
(CRETÁCEO INFERIOR) NO CAMPO DE GÁS DE JACUÍPE,
BACIA DO RECÔNCAVO (BA)**

Trabalho de Conclusão de Curso
(Bacharelado Geologia)

UFRJ
Rio de Janeiro
2006

Ana Paula Pires Coura

ANÁLISE DE FÁCIES DA FORMAÇÃO MARACANGALHA (CRETÁCIO INFERIOR)
NO CAMPO DE GÁS DE JACUIPE, BACIA DO RECÔNCAVO (BA)

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação em Geologia, Instituto de
Geociências, da Universidade Federal do
Rio de Janeiro – UFRJ, como requisito
necessário para obtenção do grau de
Bacharel em Geologia.

Orientadores:

Leonardo Borghi
José Agnelo Soares

Rio de Janeiro
Dezembro de 2006

Coura, Ana Paula
Análise de fácies da Formação Maracangalha (Cretáceo Inferior) no
campo de gás de Jacuípe, bacia do Recôncavo (BA)
Ana Paula Pires Coura - - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2007.
xii, 28 p.; 30cm (Instituto de Geociências – UFRJ, B.Sc., Curso de
Graduação em Geologia, 2006)

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)– Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Instituto de Geociências,
Responsável: Leonardo Borghi
1.Bacia do Recôncavo. 2.Eletrofácies. 3.Gás. 4. Cretáceo.
5.Formação Maracangalha. Borghi, Leonardo. II. IGEO/UFRJ

Ana Paula Pires Coura

ANÁLISE DE FÁCIES DA FORMAÇÃO MARACANGALHA (CRETÁCIO INFERIOR)
NO CAMPO DE GÁS DE JACUÍPE, BACIA DO RECÔNCAVO (BA)

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação em Geologia, Instituto de
Geociências, da Universidade Federal do
Rio de Janeiro – UFRJ, como requisito
necessário para obtenção do grau de
Bacharel em Geologia.

Orientadores:

Leonardo Borghi
José Agnelo Soares

Aprovada em: 19 dez. 2006
Por:

Prof. Leonardo Borghi (UFRJ)

Prof. José Agnelo Soares (UFRJ)

Geól. José Maurício Caixeta (Petrobras)

UFRJ
Rio de Janeiro
2006

Dedico este trabalho à minha família:
meus pais e minhas irmãs, pelo apoio, e
meu sobrinho Henrique, que fez os últimos
anos muito mais divertidos.

Agradecimentos

Agradeço à minha família que foi fundamental durante todos esses anos de faculdade, sem a qual seria impossível ter chegado até aqui.

Ao Mauro que foi muito importante durante todas as etapas pessoais e acadêmicas desses últimos anos, sendo amigo, companheiro, geólogo...

A toda turma de 2002 (Geologuinhos do Amanhã) que tornaram a faculdade muito mais divertida e prazerosa. Em especial: Alice, Alessandra, Carol, Giselle, Ghislaine, Kátia, Luana, Priscilla (minha companheira de todos os campos e horas!), Samille e Thayana.

Ao professor e amigo Leonardo Borghi pela atenção e pelos momentos dedicados para que este trabalho chegasse ao fim;

Ao professor José Agnelo Soares pela paciência de ensinar os programas e colaborar no trabalho.

À turma do Lagesed: Carlos, Juliana, Léo, Marina, Sabrina, Marcelo, Max e Vívian, Thiago, Gabriel, Freiman, que foram amigos maravilhosos e responsáveis por muitas gargalhadas.

Ao BDEP-ANP, em especial, pela cessão dos perfis de dois poços do campo de gás de Jacuípe, necessários para a realização do trabalho;

Ao Programa de Capacitação de Recursos Humanos em Geologia do Petróleo da UFRJ (conv. UFRJ/PRH-ANP/MCT n.18) pela concessão da bolsa e suporte financeiro durante todo o desenvolvimento do projeto.

A todos meu muito obrigado e saibam que sentirei muita saudade!!

Resumo

COURA, Ana Paula Pires. **Análise de fácies da Formação Maracangalha (Cretáceo Inferior) no campo de gás de Jacuípe, bacia do Recôncavo (BA)**. Rio de Janeiro, 2006. xii, 28p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Este estudo buscou uma análise de fácies da Formação Maracangalha focada nos conceitos de lito- e eletrofácies, com base em dados sedimentológicos e petrográficos de superfície (afloramento), além de dados geofísicos (GR, SP, RHOB) de poços de sondagem (9-JA-12-BA e 7-JA-14-BA) do campo de gás de Jacuípe (bacia do Recôncavo). Os resultados apontaram para a caracterização de 14 litofácies, organizadas em 2 tratos de fácies, dentro de um sistema lacustre (Fase Rifte do oceano Atlântico Sul, Eocretáceo), o que amplia a caracterização de fácies e a discussão de processos e mecanismos deposicionais já aventados (processos trativos e fluxos turbidíticos) ao incorporar conceitos de fluxos hiperpicnais. Paralelamente, o estudo dos dados geofísicos logrou uma abordagem inédita de eletrofácies para o campo de Jacuípe, da qual resultou a identificação de 7 eletrofácies, organizadas em 6 eletrossequências, as quais são correlacionadas a intervalos estratigráficos identificados em trabalhos anteriores. A boa correlação entre informações sedimentológicas (paleodeposicionais) de litofácies e estratigráficas de eletrofácies alcançada abre caminho para novos estudos da arquitetura deposicional da formação, assim contribuindo para o conhecimento das heterogeneidades faciológicas dos reservatórios do sistema petrolífero Candeias–Maracangalha(!).

Palavras-chave: Bacia do Recôncavo; Eletrofácies; Gás; Cretáceo; Formação Maracangalha; Colapso de frente deltaica

Abstract

COURA, Ana Paula Pires. **Análise de fácies da Formação Maracangalha (Cretáceo Inferior) no campo de gás de Jacuípe, bacia do Recôncavo (BA)**. Rio de Janeiro, 2006. 28p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

This study aimed litho- and electrofacies analysis of the Maracangalha Formation based on sedimentologic and petrographic informations from outcrops, and from geophysical (GR, SP, RHOB) and corings from two wells (9-JA-12-BA e 7-JA-14-BA) of the Jacuipe gas field (Recôncavo Basin). The characterization of 14 lithofacies, organized in 2 facies tracts, enhanced the facies analysis by a more extensive discussion of hyperpycnal flows, in addition to other depositional mechanisms and processes already suggested (tractive and turbiditic flows) in a lacustrine depositional system (Rift Phase of the South Atlantic, Early Cretaceous). The geophysical study of the well data allowed a new electrofacies discussion for the Jacuipe field, that resulted in the characterization of 7 electrofacies, grouped in 6 electrosequences, that were correlated to stratigraphic intervals defined by previous studies. The good correlation between sedimentological (lithofacies) and stratigraphic (electrosequences) data opens way for new frontiers of depositional gearchitecture studies, what contributes to the facilogic heterogeneity knowledge of the Candeias—Maracangalha Petroleum System.

Key- Words: Reconcavo Basin; Electrofacies, Gas, Cretaceous, Maracangalha Formation; Deltaic Failure

Lista de figuras

Figura 1-Mapa de arcabouço estrutural da bacia do Recôncavo, onde estão assinalados os pontos visitados (q.v. Quadro 1) e o campo de Jacuípe (modif. Figueiredo <i>et al.</i> , 1994)	3
Figura 2 - Diagrama estratigráfico mostrando a relação da Formação Maracangalha com as demais formações associadas.	7
Figura 3 - Modelo deposicional proposto para a Formação Maracangalha, no qual é possível observar os dois tratos de fácies interpretados como possível cenário para a deposição dos arenitos dos membros Pitanga e Caruaçu. (A) colapsamento de frente deltaica; (B) Inundações catastróficas.	13
Figura 4 - Ilustração do Trato de fácies de colapsamento de frente deltaica.	14
Figura 5 - Síntese dos processos descritos por Shanmugam (2000) para fluxos densos de reologia plástica.	14
Figura 6 - Ilustração do Trato de fácies de inundações catastróficas.	16
Figura 7 - Diferentes formas da hidrografia de uma inundação (Syvitski & Alcott, 1995).	17
Figura 8 - Mostra a evolução desde a sub-associação de fácies distais, mostrando um fluxo com base densa e superior turbulento, até a sub-associação de fácies proximais (modif. Mutti <i>et al.</i> , 2000).	19
Figura 9 - Síntese das assinaturas nas curvas dos perfis geofísicos de cada eletrossequência.	24
Figura 10 - Seção de correlação entre os dois poços estudados mostrando as seis eletrossequências definidas.	25

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Tabela com valores médios padronizados de cada perfil analisado para cada eletrofácies observada.

20

Lista de Quadros

Quadro 1 - Relação de afloramentos estudados.	5
Quadro 2 - Quadro síntese das litofácies descritas.	10
Quadro 3 - Síntese da correlação entre as fácies sedimentares de autores anteriores e o presente trabalho.	11
Quadro 4- Tabela síntese da associação das eletrossequências	22

Sumário

Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	ix
Lista de Quadros	x
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Contexto Geológico	2
1.2 Material e método	3
1.3 Formação Maracangalha	6
1.4 Geologia do Petróleo	8
1.5 Campo de Jacuípe	9
2 RESULTADOS	10
2.1 Litofácies	10
2.1.1 Caracterização das litofácies	10
2.1.2 Trato de fácies	12
2.2 Eletrofácies	19
2.2.1 Caracterização das eletrofácies	19
2.2.2 Eletrosseqüências	21
3 CONCLUSÕES	26
Referências bibliográficas	27
Apêndice A – Resultados da análise petrográfica	
Apêndice B – Caracterização das litofácies	
Apêndice C – Estampas de ilustração	
Apêndice D – Caracterização das eletrofácies	
Anexo A – Artigo de SOARES (2005)	
Anexo B – Artigo de GUERRA & BORGHI (2003)	

1 INTRODUÇÃO

A participação do gás natural na matriz energética mundial vem aumentando ao longo dos anos. O Brasil acompanha essa tendência, pois trata-se de um combustível veicular e de co-geração de energia elétrica com menor índice de poluição além de outras aplicações, como na indústria petroquímica e siderurgia. Por estes motivos, vem sendo chamado de “combustível do futuro”. O desenvolvimento de reservas nacionais é de fundamental importância estratégica, visto que o gás natural apresenta grandes dificuldades logísticas de transporte para sua importação. No Brasil, a bacia do Recôncavo destaca-se nesse panorama por apresentar grande volume de produção de gás associado e não-associado (826 e 1430 milhões de m³ respectivamente, dados ANP do ano de 2004*), na qual os arenitos da Formação Maracangalha contêm os seus principais reservatórios de gás não-associado.

A análise de fácies sedimentares é essencial para o desenvolvimento de um reservatório, pois além de caracterizá-lo permite prever suas propriedades petrofísicas e qualidade. Deste modo, o trabalho objetiva a análise faciológica da Formação Maracangalha, particularmente de seus arenitos com base na integração de dados sedimentológicos de afloramentos (litofácies) e geofísicos em perfis elétricos de poço (eletrofácies), com a finalidade de melhor compreender as heterogeneidades faciológicas em micro- e mesoescala associadas aos reservatórios do sistema petrolífero Candeias–Maracangalha (!), no campo de gás de Jacuípe.

Entre as principais motivações para o estudo estão a possibilidade de integração rocha—perfil pela disponibilidade de dados de subsuperfície (poços) e a importância econômica da produção de gás em corpos de arenito depositados por processos gravitacionais da fase Rife, tais como os aqui investigados.

* Obtido no sítio <http://www.anp.gov.br>, consultado em 8 dez. 2006

1.1 Contexto geológico

A bacia do Recôncavo, localizada na porção terrestre no Estado da Bahia (Figura 1), ocupa uma área de 11.500 km² e é classificada como um aulacógeno, segundo a classificação de Szatmari & Porto (1985 *apud* Figueiredo *et al.*, 1994). Corresponde à porção Sul do Rifte Intracontinental Recôncavo–Tucano–Jatobá, um sistema de riftes que se estende para Norte. A sedimentação e evolução tectônica da bacia do Recôncavo foram controladas pelo campo de tensões extensionais decorrentes da fragmentação do paleocontinente Gondwana durante o Neojurássico–Eocretáceo, extinto no Aptiano (final do Eocretáceo), o que culminou com o abandono do rifte.

A bacia é limitada a norte pelo alto de Aporá, que a separa da bacia do Tucano Sul, e, a sul, da bacia de Camamu, pela Falha da Barra. A leste, é limitada pela Falha de Salvador, formada por um conjunto de falhas normais de grande rejeito, e, a oeste, pela falha de Maragogipe. Os baixos estruturais de Camaçari, Miranga e Quiambina formam a “calha principal” da bacia. (Figueiredo *et al.*, 1994)

A bacia do Recôncavo é ainda subdividida em três compartimentos estruturais: as sub-bacias norte, central e sul. As sub-bacias sul e central são as mais importantes para este estudo, uma vez que naquela se encontram os afloramentos estudados e, nesta, o campo de gás de Jacuípe (Figura 1).

A sub-bacia sul possui *ca.* 5.000 km² e é separada da porção central pela falha transcorrente de Mata–Catu, cujo depocentro principal é o baixo de Camaçari. Possui dois compartimentos estruturais separados pelo alto de Dom João. A leste e a sudeste deste alto, a sub-bacia apresenta um escalonamento descendente através de falhas normais sintéticas, até o baixo. Já a oeste e noroeste do alto, encontram-se dois grandes blocos basculados chamados Fazenda Ipiranga e Santo Amaro, ambos limitados por uma falhas antitéticas (Milani, 1987).

A sub-bacia central ocupa uma área de 3.500 km² e é limitada a noroeste pela falha de Tombador e a nordeste e sudoeste por falhas de transferência. Apresenta dois depocentros diferentes, os baixos de Miranga e de Alagoinhas, sendo o primeiro junto à Falha de Salvador e o segundo, à falha de Tombador. Os dois depocentros são separados pelo alto de Mata—Araçás. Os poços estudados pertencem ao campo de Jacuípe, localizado no baixo de Miranga.

Neste trabalho foram utilizados os conceitos de litofácies e eletrofácies, foco da presente análise de fácies. Borghi (2000, p.2) define fácies como uma “*massa de sedimento ou de rocha sedimentar caracterizada e distinguida das demais pela litologia, geometria estratal, estruturas sedimentares, petrotrama, cores, fósseis e por atributos direcionais*”,

cujo, reconhecimento é feito de modo direto nas rochas, tal como numa litofácies, que privilegia a escolha de atributos físicos diretos das rochas para a sua diagnose. Já as eletrofácies, que segundo Serra & Abbott (1980, p.2) tratam do “*conjunto de respostas dos perfis [geofísicos] que caracteriza um sedimento e possibilita o sedimento ser distinguido dos outros*”, permitem inferir uma configuração geológica em subsuperfície através da análise de uma suíte de perfis geofísicos (Rider, 2000), particularmente na ausência de testemunho. Assim, buscou-se aplicar os conceitos de lito- e eletrofácies de forma integrada para compreensão das heterogeneidades faciológicas da Formação Maracangalha, uma vez que não se dispunham de testemunhos para descrição das litofácies.

Para a realização do presente trabalho foram visitados 5 afloramentos na região da baía de Todos os Santos (Quadro 1), os quais foram descritos faciologicamente para caracterização de litofácies em termos mesoscópicos, e de onde foram coletadas amostras de arenito para análise microscópica (microscópio petrográfico Zeiss AXIOPLAN 40), em apoio à caracterização de litofácies, discussão de processos sedimentares, além da caracterização da qualidade de potenciais reservatórios. Para a caracterização de litofácies os principais atributos utilizados para descrição foram a litologia, geometria e estrutura sedimentar. Confeccionaram-se 16 lâminas delgadas nas quais foram caracterizadas a textura e a composição, o que permitiu classificá-las petrograficamente (litologia), a partir da contagem de 300 pontos por lâmina (Apêndice A). As litofácies foram organizadas geneticamente em tratos de fácies, que são sucessões horizontais de fácies (*cf.* Borghi, 2000) relacionadas por processos derivados, aos quais aplicou-se a interpretação do contexto de sistema deposicional.

Na análise de eletrofácies, foram utilizadas curvas de raio-gama (GR), potencial espontâneo (SP) e densidade total (RHOB) em dois poços do campo de Jacuípe (7-JA-14-BA e 9-JA-12-BA), através de uma técnica híbrida de processamento de dados proposta por Soares (2005), na qual uma classificação não-supervisionada, que inclui presença de

descrição de testemunho, funciona como entrada de dados para uma outra classificação, supervisionada, com ausência de descrição de testemunho (Anexo A). Porém, neste trabalho, as poucas descrições de testemunho, disponíveis, não modificaram os resultados de maneira significativa, sendo, portanto, ineficaz o uso da classificação supervisionada.

Quadro 1 – Relação de afloramentos estudados.

Pontos	Localidade (toponímia)	Unidade estratigráfica
1	Ilha do Frade	Membros Pitanga e Caruaçu
2	Madre de Deus	Membro Pitanga
3	Ilha de Maré	Membro Pitanga
4	Ponta da Sapoca	Membro Caruaçu
5	Praia de Bom Despacho (Ilha de Itaparica)	Membro Caruaçu

O programa analítico utilizado para processar os dados dos perfis foi o Enterprise Guide 3.0[®] (SAS); para a parte gráfica, utilizou-se o programa Grapher 2.0[®]. Os procedimentos do programa analítico foram repetidos até que os resultados obtidos fossem satisfatórios; ou seja, até que o número de eletrofácies adquirido fosse consistente com as informações de litofácies obtidas previamente em afloramentos.

Através da análise das eletrofácies foi possível identificar não apenas propriedades petrofísicas, mas também atributos de litofácies distintas, uma vez que há relação direta de propriedade física, medidas através de perfis, com litologias, texturas e até mesmo estruturas sedimentares. Em certas situações é até mesmo possível que haja a possibilidade de discernimento de certos atributos cuja capacidade visual do observador seja um fator limitante. Não obstante, é importante ressaltar que todo método analítico em geofísica tem fatores limitantes que podem causar uma leitura errônea da litofácies; como por exemplo, a presença ou ausência de minerais potássicos, matéria orgânica, fluidos, ou até mesmo geometria do poço, resolução vertical da ferramenta e velocidade da perfilagem, entre outros (Barbosa *et al.*, 2005). Por isso é fundamental que se conheçam as condições durante a

perfilagem e a geologia da área, como aqui se buscou pela integração com dados sedimentológicos de campo. A partir daí é possível identificar, por exemplo, se folhelhos de maior densidade identificados nas eletrofácies, podem ser resultado de concreções carbonáticas (efeito diagenético), um aspecto não considerado na diagnose de litofácies.

1.3 Formação Maracangalha

Litologicamente, a Formação Maracangalha é constituída predominantemente por lamitos e, subordinadamente, arenitos. Estes arenitos compõem espessos pacotes lenticulares que constituem os “membros” Pitanga e Caruaçu, identificados em diversos níveis estratigráficos. Posiciona-se estratigraficamente de forma concordante acima da Formação Candeias e lateralmente interdigita-se com a Formação Salvador (Figura 2).

Em termos paleoambientais, registra a sedimentação de um sistema lacustre formado durante a fase Rife da bacia do Recôncavo, no Eocretáceo (idades locais Rio da Serra—Aratu), no qual pacotes de arenitos depositados em meio aos folhelhos lacustres da formação são interpretados principalmente como resultado de deposição por (i) processos gravitacionais diversos (Caixeta, 1988; Guerra & Borghi, 2003; Melo *et al.*, 1971); (ii) fluxos turbidíticos (Zalán, 1981); e (iii) fluxos hiperpicnais (Guerra & Borghi, 2003); quiçá provocados por sismos (Raja Gabaglia, 1990), inundações fluviais (Guerra & Borghi, 2003) e colapsamento de frente deltaica (Caixeta, 1988; Guerra & Borghi, 2003; Melo *et al.*, 1971).

Mello *et al.* (1971) realizaram um estudo faciológico da formação dividindo o “membro” Pitanga em três fácies e as “camadas Caruaçu” em doze fácies sedimentares, agrupando-as em três associações de fácies denominadas (1) “associação de planície deltaica”, (2) “associação de escorregamento da parte superior das calhas da frente deltaica” e (3) “associação de sedimentos resultantes de fluxo granular e de lama, da parte inferior das calhas da frente deltaica” entre os quais o Membro Pitanga deposita-se nas duas últimas associações e as

camadas Caruaçu em subambientes deltaicos de planície deltaica com canais anastomosados e distributários e suas baías interdistributárias, margem deltaica e calhas de frente deltaica. Para estes autores, os mecanismos disparadores que originaram os fluxos gravitacionais subaquosos foram: falhas de crescimento, diapirismo periódico (que criava áreas de instabilidade dos taludes) e rápido influxo de material sedimentar causando sobrecarga em zonas de sedimentos inconsolidados.

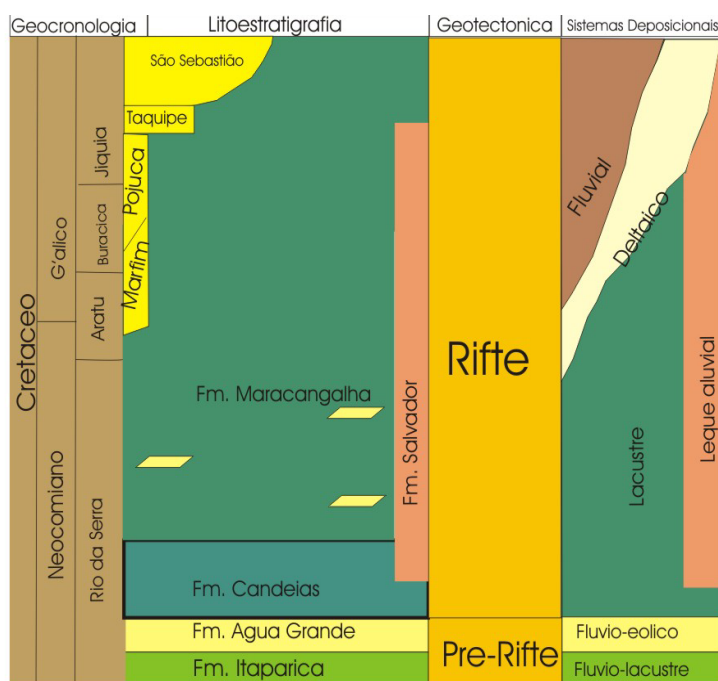


Figura 2 – Diagrama estratigráfico mostrando a relação da Formação Maracangalha com as demais formações associadas.

Caixeta (1988) estudou os arenitos da Formação Maracangalha em afloramentos e poços do campo de Jacuípe, descrevendo seis fácies sedimentares que foram agrupadas em cinco unidades faciológicas, que, em termos paleoambientais, resumem-se em subambientes de (1) “frente deltaica *in situ*”, (2) “frentes deltaicas remobilizadas por deslizamentos e escorregamentos”, (3) turbiditos canalizados e turbiditos em lobos e (4) depósitos de fluxo de detritos”, numa fase de comaltação da bacia.

Raja Gabaglia (1990) discutiu a Formação Maracangalha fundamentalmente sob o ponto de vista dos mecanismos disparadores dos fluxos gravitacionais. Para isto dividiu suas nove fácies sedimentares em três grupos: (I) fácies deposicionais de origem indefinida, onde o caráter deformativo ou de ausência de estruturas acentuam a dificuldade de estabelecimento de sua origem, sendo possível uma origem deposicional ou sismogênica; (S) fácies deposicionais sismogênicas, para as quais pode-se ter um certo grau de confiança na origem sismogênica; e (SS) fácies deposicionais *sensu stricto*, onde os caracteres deposicionais estão integral e indubitavelmente preservados.

Guerra & Borghi (2003) descreveram dez fácies sedimentares para a Formação Maracangalha, o que permitiu a divisão da história evolutiva da formação em três cenários paleogeográficos: (1) pré-Maracangalha, (2) rampa-Maracangalha (englobando os arenitos do Membro Caruaçu) e (3) plataforma-talude Maracangalha (arenitos desorganizados do Membro Pitanga). Os autores descrevem fluxos hiperpicnais e processos gravitacionais subaquosos como os responsáveis pela deposição dos corpos arenosos da formação, e chamam a atenção para litossomas indeformados escorregados, caracterizados como olistólitos.

1.4 Geologia do Petróleo

A bacia do Recôncavo foi a pioneira na produção de hidrocarbonetos no país, tendo sido o poço 1-L-3-BA o primeiro a ser perfurado, no ano de 1939, passando a ser o primeiro produtor de óleo no Brasil.

Atualmente são reconhecidos 6 sistemas petrolíferos provados na bacia do Recôncavo: Candeias–Sergi(!), Candeias–Água Grande(!), Candeias–Candeias(!), Candeias–Maracangalha(!) e Candeias–Pojuca(!), cujos reservatórios se distribuem pelas fases Pré-rifte

e Rifte. A principal rocha geradora de hidrocarbonetos são os folhelhos do Membro Gomo da Formação Candeias.

Hoje em dia, a bacia do Recôncavo participa como uma das cinco principais na produção de gás natural no país. Pela intensidade do exercício exploratório e ausência de descobertas recentes significativas pela indústria petrolífera, é considerada madura. Neste cenário, a continuidade da produção exige um refinamento dos modelos deposicionais e a reanálise dos perfis existentes com intuito de aumentar a recuperação de campos antigos.

1.5 Campo de gás de Jacuípe

O campo de Jacuípe foi descoberto em 1956 através do poço pioneiro 1-JA-1-BA, fazendo parte do início das campanhas exploratórias da Petrobras. Possui aproximadamente 15 km² de área e está situado no compartimento central da bacia no baixo de Miranga e próximo da falha de Mata—Catu. Representa uma das maiores e mais importantes acumulações de gás na bacia do Recôncavo, com um volume de gás *in place* 4 bilhões de m³ (J.M. Caixeta, *inf. verbal*).

O maior volume de gás encontra-se nos arenitos do Membro Caruaçu, que detêm 90% da acumulação (J.M. Caixeta, *inf. verbal*), sendo todo o restante extraído dos arenitos do Membro Gomo (Formação Candeias) e da Formação Água Grande, neste campo.

2 RESULTADOS

2.1 Litofácies

2.1.1 Caracterização das litofácies

A partir das descrições realizadas em campo e apoiando-se na análise petrográfica, foi possível caracterizar 14 litofácies sedimentares para a Formação Maracangalha. Estas fácies, como serão doravante tratadas, estão sumarizadas no Quadro 2.

O presente estudo aprofundou aquele realizado por Guerra (2002) e Guerra & Borghi (2003), com intuito de refinar seu modelo deposicional do ponto de vista dos processos deposicionais vigentes na deposição dos corpos arenáceos e correlacionar as litofácies deste trabalho com àquelas da literatura (Quadro 3).

Quadro 2 – Quadro síntese das litofácies descritas.

Fácies	Diagnose	Interpretação
PC	Paraconglomerado monomítico, maciço (embora localmente insinue-se orientação), acinzentado, composto por intraclastos de folhelho de tamanho centimétrico (seixos) arredondados a angulosos, imersos em matriz constituída de areia fina superior. Ocorre em camada de porte médio e apresenta contato superior nítido e inferior erosivo	Fluxo de detritos (granular) não-coesivo
Al	Arenito muito fino superior, moderadamente a pobremente selecionada, com laminação plano-paralela e coloração cinza-amarelada. As camadas variam de pequeno a médio porte e possuem contato nítido e erosivo na base	Tração sob regime de fluxo superior com formação de leito plano
Ac	Arenito fino a médio, moderadamente selecionado, amarelado, com estratificação cruzada acanalada, ocorrendo em camada de porte médio. Contato inferior erosivo e superior nítido	Migração de mesoformas de leito (megaondulações) por um processo trativo subaquoso sob regime de fluxo inferior
Acc	Arenito fino a muito fino, argiloso, moderadamente selecionado, com laminação cruzada cavalgante. Geralmente apresenta contato erosivo na base gradacional e nítido no topo. Ocorrem, em geral, em camadas de porte médio	Migração clino-ascendente de microformas de leito (ondulação) por fluxo trativo combinado com decantação, em regime de fluxo inferior
Ad	Arenito fino lamoso, pobremente selecionado, com estruturas deformacionais dúcteis, tais como dobras convolutas, falhamentos sinsedimentares e intraclastos de arenito arredondados rotacionados, e abundantes fragmentos de matéria orgânica vegetal. Ocorrem em camadas de porte muito grande com contatos inferior e superior indefinidos	Ressedimentação decorrente de escorregamento (<i>slump</i>)
Adi	Arenito fino lamoso, pobremente selecionado, com falhas de cisalhamento (horizontais) e de cavalgamento (“imbricação”), e fragmentos de matéria orgânica vegetal. Ocorrem em camadas de porte muito grande com contatos inferior e superior indefinidos	Depósito por congelamento retrogradacional de um fluxo de detritos arenoso

(Cont.)

Quadro 2 – (Cont.)

Fácies	Diagnose	Interpretação
Ae	Arenito muito fino lamoso, moderado à pobremente selecionado, maciço ou com estruturas de escape de fluido, tal como pilar	Fluxo liquefeito/fluidizado
Aep	Arenito fino a muito fino, amarelado, moderadamente selecionado, com estruturas de escape de fluido em prato. Ocorrem em camada de porte médio	Abundante escape de fluido intersticial durante ou após a deposição de areias para fluxos liquefeitos
Am	Areia fina superior, maciça e de coloração amarela. Ocorre em camadas de porte métrico	Depósito de um fluxo granular (fluxo de detritos arenoso)
Aml	Arenito muito fino, lamoso, moderadamente selecionado, maciço, com abundante presença de intraclastos de argila e fragmentos de material orgânico vegetal centimétricos. Ocorre em camadas de porte grande	Depósito de fluxo de detritos (<i>debris flow</i>)
Ab	Arenito muito fino inferior, pobremente selecionado, coloração de cinza a verde e com bandamentos internos de granulometria mais fina (argilosa). Ocorrem fragmentos de matéria orgânica e intraclastos de argila. Podem ocorrer acima de um arenito maciço e abaixo da deposição de camadas com intraclastos orientados	Fluxos gravitacionais do tipo <i>slurr</i> .
Bi	Brecha composta por folhelho cinza escuro físsil, com abundantes injeções de diques e lâminas irregulares. A matriz é constituída de areia predominantemente fina. Apresenta contato inferior do tipo irregular e superior erosivo	Desagregação do substrato lamoso após a passagem de um fluxo gravitacional arenoso com injeção de areia no substrato
L	Lamito siltico cinza com estrutura maciça	Decantação de um fluxo “quase-estático” da porção terminal de fluxos turbulentos de baixa densidade
Lp	Lamitos argilosos de cor cinza escura a preta com acamamentos muito delgados. Apresentam-se em camadas que variam de decimétricas a métricas	Decantação de finos em baixa energia em ambiente redutor

Quadro 3 – Correlação entre as fácies sedimentares de autores anteriores e o presente trabalho.

Mello <i>et al.</i> (1971)	Caixeta (1988)	Raja Gabaglia (1990)	Guerra & Borghi (2003)	Este trabalho
--	---	---	---	PC
--	~ Conglomerados intraformacionais	B-II	---	Bi
τ	Arenitos silto-argilosos	---	Am	Am ₁
--	---	---	---	Ac
--	Arenito com estratificação plano-paralela	E	5 (Td)	Al
--	~ Arenitos com estratificação cruzada tangencial e <i>ripples</i>	F	5 (Tc)	Acc
--	---	---	---	Ab
--	Arenito com estratificação cruzada tangencial e escorregamentos	BI-A(?)	Ad	Adi
α	Arenito com estratificação cruzada tangencial e escorregamentos	~ BI	Ad	Ad
--	Arenitos maciços com escape de fluido	A-I	=Ae	Ae
--	Arenitos maciços com escape de fluido			Aep
--	---	D	6	L
--	---	C	=Lp	Lp

2.1.2 Tratos de fácies

Os depósitos da Formação Maracangalha, apesar de estudados desde a década de 1950, ainda são passíveis de discussão, uma vez que a sedimentação de processos usualmente evocados gravitacionais subaquosos vem sendo revista pela literatura no que tange aos mecanismos disparadores e de sustentação dos grãos e duração dos eventos. As transformações de fluxo durante o transporte do material para processos gravitacionais podem ser muito variadas e, portanto, torna-se possível apenas entender o mecanismo de deposição (Shanmugam, 2000). Para Kuenen (1950 *apud* Shanmugam, 2000) tais transformações são importantes e talvez sejam o fenômeno menos entendido pela Sedimentologia.

Trabalhos anteriores sobre a formação, sobretudo no Membro Caruaçu, interpretam os depósitos sedimentares como turbidíticos de água profunda (Mello *et al.*, 1971; Caixeta, 1988 e Raja-Gabaglia, 1990). Porém, no presente estudo, abre-se o leque de discussão para outros contextos paleoambientais que podem ter sido atuantes na deposição dessas rochas. Sob a luz desses conceitos, este trabalho propõe-se a refinar o modelo de fácies apresentado por Guerra (2002) e Guerra & Borghi (2003).

Foi possível construir dois tratos de fácies que descrevem alguns dos possíveis cenários que participaram da evolução do antigo sistema lacustre Maracangalha. Envolvem a sedimentação proximal e distal do lago, no qual, no contexto proximal, distinguem-se os registros da desestabilização da frente deltaica e eventos de inundação catastrófica (Figura 3).

Trato de fácies de colapsamento de frente deltaica. – Este trato é composto pelas fácies Ad, Adi, Am_I e Ae, que podem ser observadas nos pontos 1, 3 e 5 (Figura 4) Compõem o Membro Pitanga, sendo conhecidas como “fácies desorganizadas” da Formação Maracangalha.

A fácies Adi pode caracterizar duas situações da evolução do escorregamento para fluxos gravitacionais. A primeira, para fluxos mais arenáceos, em que se apresentam

estruturas cisalhantes horizontais semelhantes a laminação plano-paralela. Nesse caso, é desenvolvida por cisalhamento interno através de movimentação pós-deposicional ao longo de planos de fraqueza (Shanmugam, 2000) (Figura 5). A segunda, pode ocorrer o congelamento devido à frenagem seguido de sucessivos cavalgamentos, uma sobre a outra, em um movimento compressional nas porções basal e frontal do fluxo mais arenáceas (fluxo de detritos arenoso) Este mecanismo foi observado por Shanmugam (2000) em experimentos de laboratório (Figura 5), por ele designada como imbricação.

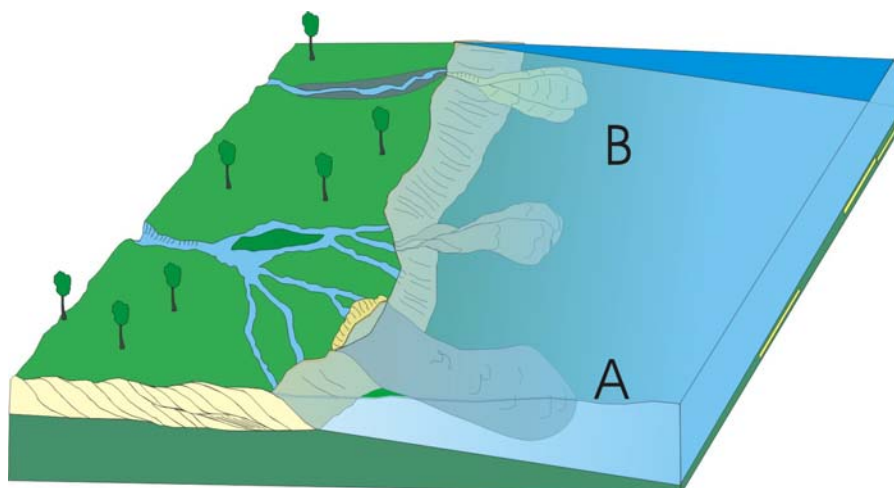


Figura 3 – Modelo deposicional proposto para a Formação Maracangalha, no qual é possível observar os dois tratos de fácies interpretados como possível cenário para a deposição dos arenitos dos membros Pitanga e Caruaçu. (A) colapsamento de frente deltaica; (B) Inundações catastróficas.

A fácies Aml está melhor exposta no ponto 1. Representa a evolução para um fluxo areno-lamoso marcado pela entrada de água no sistema, caracterizado como um fluxo de detritos. Nesta fase, a incorporação de água e a elutriação da argila diminuem a capacidade de sustentação dos grãos propiciando uma deposição súbita de massa de sedimentos. Observa-se com dificuldade estruturas e escape de fluido.

Por último, a fácies Ae (Guerra, 2002 e Guerra & Borghi, 2003) caracteriza a fase final de transformação desse fluxo, sendo descrita no ponto 1. A contínua incorporação de água em

um fluxo areno-lamoso causa o aumento da razão areia/argila por elutriação cujo mecanismo de sustentação dos clastos passa a envolver choque de grãos, em fluxo arenoso (*sand debris*) ou liquefeito.

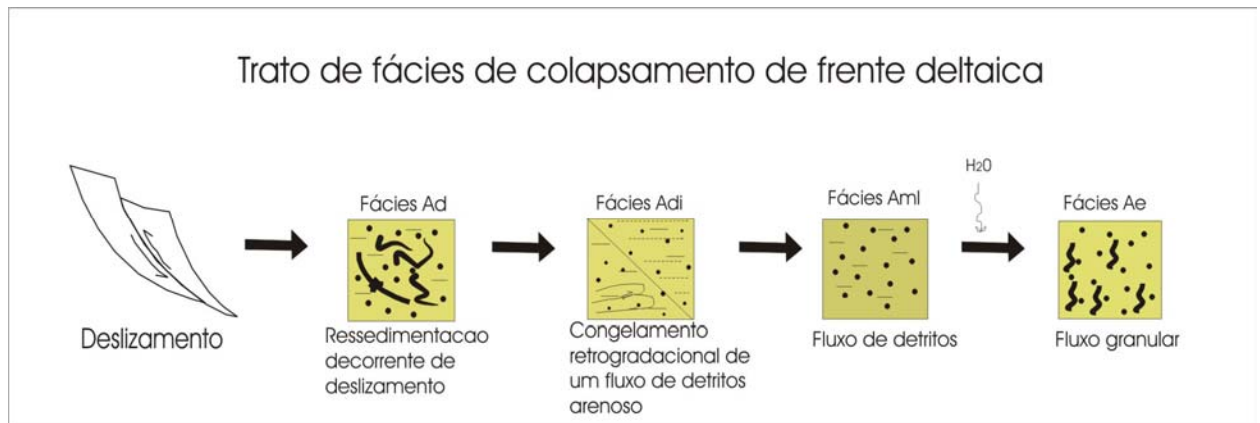


Figura 4 – Ilustração do Trato de fácies de colapsamento de frente deltaica.

Feições	Observação	Interpretação
	Camadas internas	Movimento de massa e Planos de deslizamento secundários
	Fatias imbricadas	Movimento de massa e compressão
	Blocos isolados	Movimento de massa e tensão
Direção do fluxo 		
120 µm areia silicosa 500 µm carvão slag (densidade total: 2.6 g/(cm ³))		

Figura 5 – Síntese dos processos descritos por Shanmugam (2000) para fluxos densos de reologia plástica, utilizados na interpretação da litofácies Adi.

O olistostroma é composto pelas fácies Ad e Adi, que representam uma evolução do processo gravitacional. A movimentação da massa desestabilizada ocorreu pela deformação plástica sob regime de tensão cisalhante que ocorre nas porções sedimentares mais lamosas. Tal deformação, variável em função da reologia (plástica) do próprio material origina a fácies

Ad. Ao final desse processo surgem as estruturas do tipo *tension gashes* (que são veios em alto ângulo com a direção de extensão-direção de abertura). Em seguida, nas porções com menores teores de lama, surgem falhas sedimentares de pequeno rejeito durante um processo de deformação rúptil.

O trato é interpretado como resultado da desestabilização e colapsamento gravitacional de frente deltaica por mecanismos como excesso de carga sedimentar e/ou abalos sísmicos (Raja Gabaglia, 1990). A partir do colapsamento da frente deltaica inicia-se um processo de escorregamento (*slump*) envolvendo sedimentos depositados desde regiões próximas à desembocadura do rio até a frente deltaica. O material caótico depositado configura olistostromas, que podem conter porções indeformadas da frente deltaica, olistólitos contendo registro dessa sedimentação mais proximal envolto numa massa argilosa resultante de mistura de fácies arenosas e argilosas (olistostroma).

Trato de fácies de inundações catastróficas. – Este trato é composto pelas fácies PC, Bi, Am, Acc, Al, L, Ac, Ab e pode ser entendida como resultado de eventos de inundações catastróficas fluviais (Figura 6). Podem ser separadas em dois sub-tratos caracterizando condições ambientais distintas: (1) um envolvendo a sedimentação da porção mais proximal à desembocadura de um rio, texturalmente (granulometricamente) variada em um sistema flúvio-deltaico e (2) outro, no qual se envolve a sedimentação mais distal (granulometria mais fina e selecionada) ou um outro contexto flúvio-lacustre proximal com uma fonte sedimentar texturalmente (granulometricamente) menos variada.

O *primeiro sub-trato de fácies*, é composto pelas fácies Bi, Acc, Al, L e Lp e envolve uma maior sedimentação trativa e suspensiva, podendo ser interpretada como uma corrente turbulenta. São tipicamente reconhecidas nos pontos 4 e 5 e, secundariamente, no ponto 1. Geograficamente, pode compor a parte proximal do sub-trato de fácies ou ser resultado da deposição de uma área fonte enriquecida em sedimentos mais grossos.

As estruturas sedimentares predominantes, a laminação plano-paralela (Al) e a ondulação cruzada cavalgante (Acc), resultam da variação de energia durante o evento. Estas fácies apresentam pacotes espessos com empilhamento das estruturas, mostrando uma constância do fluxo. Relações de erosão entre as fácies (Acc em contato erosivo com Al) demonstram flutuações da energia do fluxo.

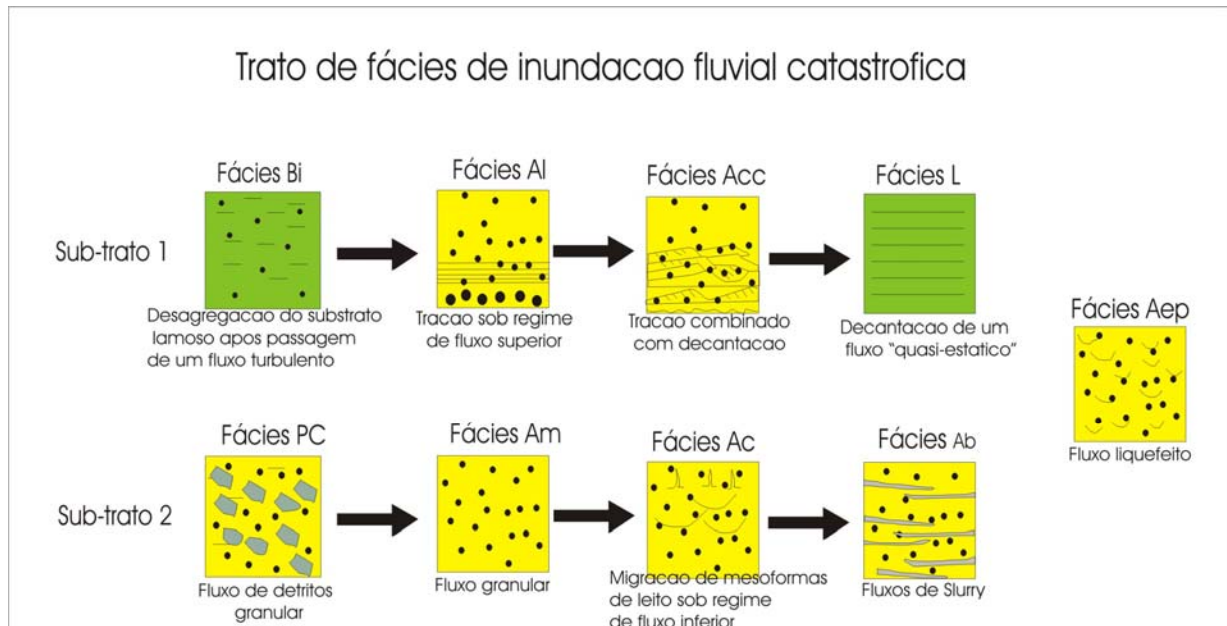


Figura 6 – Ilustração do Trato de fácies de inundações catastróficas.

A fácies Bi mostra uma particularidade destes fluxos e demonstra o alto grau de energia envolvido. Formou-se pela passagem de um fluxo gravitacional subaquoso que, devido ao atrito e sua velocidade, desloca o substrato argiloso do fundo do lago injetando areia nestes espaços.

A fácies L representa a deposição por decantação dos sedimentos finos na porção terminal de fluxos turbulentos de baixa densidade. Esta fácies é considerada como a sedimentação final de uma corrente turbulenta, onde começa haver um enfraquecimento do mesmo por decantação (Mutti *et al.*, 2003) e uma cauda de fino é depositada já numa fase “quase-estática” do fluxo turbidítico de baixa densidade, sendo este o último evento de

deposição do fluxo (Mutti *et al.*, 1996).

Estas considerações resultam na interpretação destas camadas por eventos de longa duração e de energia variada, tipicamente gerado por inundações fluviais. O padrão de sedimentação resultante é função da característica hidrográfica do fluxo, como pode-se ver na Figura 7 (Syvitski & Alcott, 1995). A fácies Lp representa a sedimentação pelágica do lago (“background”).

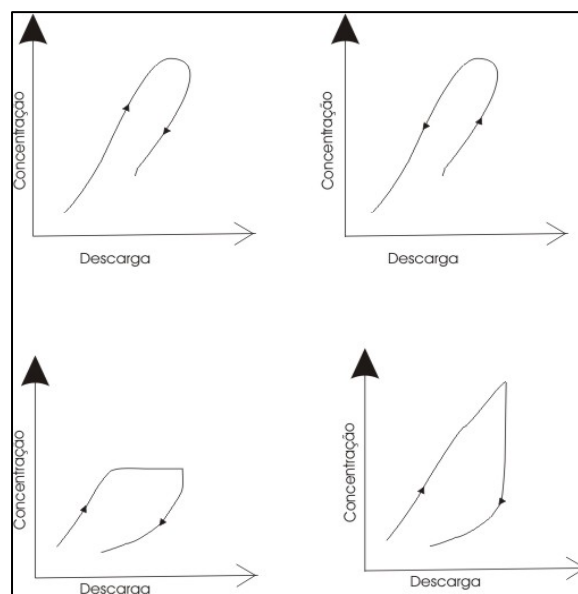


Figura 7– Diferentes formas da hidrografia de uma inundação (Syvitski & Alcott, 1995)

O *segundo sub-trato* de grã mais fina só foi observada no olistólito (ponto 3) que, como explicado anteriormente, provém do colapsamento da frente deltaica. Compõem este sub-trato as fácies PC, Am, Ac e Ab, que mostram uma sucessão de variação de energia ocorrida na desembocadura do rio durante o evento de inundação catastrófica. Apresenta grande correlação com o modelo demonstrado por Mutti *et al.* (2000), baseado em depósitos de fan-deltas dominados por inundações descritos na Formação Santa Liestra (Pirineus/Espanha) (Figura 8).

A fácies PC foi depositada a partir de fluxo confinado denso que, ao entrar em um corpo aquoso “estagnado”, sofre desaceleração e expansão, perdendo sustentação em função da

diminuição da poro-pressão, causando a deposição súbita dos clastos mais grossos na cabeça do fluxo (Mutti *et al.*, 2000, 2003). Em seguida, neste mesmo ponto, com a redução da energia, passa a predominar um fluxo bipartido com o transporte dos grãos de forma laminar (fluxo granular arenoso) abaixo e a frente de um fluxo turbulento diluído (composto por sedimentos mais finos). A deposição dos sedimentos transportados pelo fluxo basal ocorre por fricção com o leito do lago e perda de cisalhamento interno por escape de água, desenvolvendo estrutura maciça (fácies Am). Nesta situação, o fluxo superior, turbulento, passa a depositar mais adiante ou mesmo sobre os depósitos do fluxo laminar na medida em que a energia diminui.

A fácies Ac, depositada em sucessão à fácies Am, registra uma situação dominada por regime de fluxo inferior onde se desenvolveram macroformas-de-leito. A origem destas estruturas, tipicamente trativas, tem duas possíveis explicações: (1) reelaboração dos sedimentos previamente depositados (fácies Am) com a continuação da passagem do fluxo (mas com menor energia) ou (2) podem ter se desenvolvido primariamente com a redução da energia do fluxo ao entrar no corpo aquoso sendo que os sedimentos passaram a ser transportados por tração.

Por último, a fácies Ab pode ser interpretada sob dois pontos de vista: (1) fluxos interpretados como *slurry* (Lowe & Guy, 2000 *et seq.*) ou (2) secundariamente como depósito de corrente laminar sugerindo fluxos depositados por plumas deltaicas ou fluxos hiperpicanais, segundo Mutti *et al.* (2000). A diferença nestas duas interpretações está no conceito de evento; pois, no primeiro, cada par de areia/argila representa um evento de deposição, enquanto que no segundo caso, o depósito (múltiplos pares de areia/argila) origina-se a partir de um único evento.

Também é interessante notar a grande quantidade de matéria orgânica vegetal continental, até pedaços de tronco, encontrados acima desta associação, mostrando a proximidade com a área

fonte. No local onde observou-se este material foi encontrado fragmento milimétrico de âmbar.

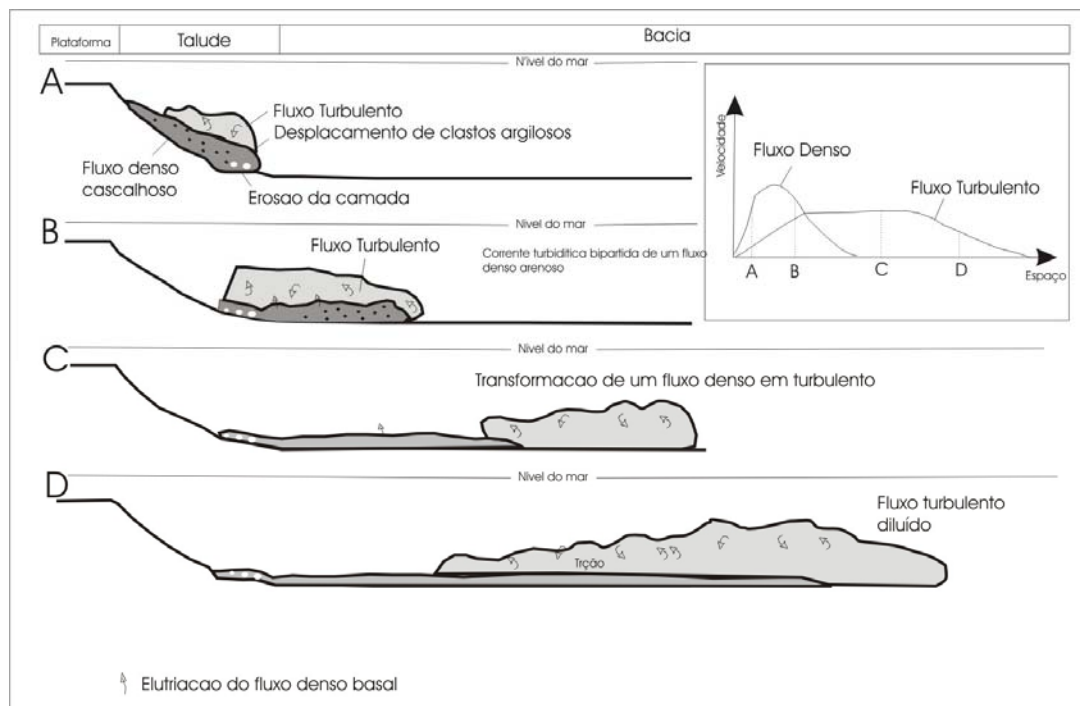


Figura 8 — O esquema acima mostra a evolução desde a sub-associação de fácies distais, mostrando um fluxo com base densa e superior turbulento, até a sub-associação de fácies distais (modif. Mutti *et al.*, 2000).

2.2 Eletrofácies

2.2.1. Caracterização das eletrofácies

Foi possível distinguir nove eletrofácies (Tabela 1, Anexo A); porém, dessas nove eletrofácies, duas foram descartadas por serem pouco representativas geologicamente, uma vez que foram consideradas como possível erro de análise ou problema durante a perfilagem. É importante ressaltar que como cada perfil trabalha numa escala própria, os valores das curvas foram normalizados, logo, tais valores passaram a ter média nula e desvio padrão unitário (Soares (2005), Anexo A), e, por esse motivo, os valores da Tabela 1 apresentam-se numericamente distintos dos valores originais de aquisição.

Para esse caso de estudo, dos três perfis utilizados os que apresentaram melhor

identificação das eletrofácies foram o de raio gama e potencial espontâneo, conforme esperado. O perfil de densidade adicionou informações sobre algumas amostras com picos discrepantes, fosse por valores mais altos (um pouco maior do que $2,65\text{g/cm}^3$) ou valores mais baixos (de aproximadamente $1,95\text{ g/cm}^3$). Entende-se que os valores mais baixos de raio gama combinados aos valores de potencial espontâneo, também mais baixo, têm maior tendência a corresponderem às rochas mais arenosas, enquanto os valores mais altos tendem a serem associados a rochas com granulometria mais fina.

Para interpretar cada eletrofácies, foram realizadas comparações entre os valores de cada uma das sete identificadas, ou seja, comparação entre os valores médios padronizados maiores e menores obtidos nos perfis de interpretação litológica: o raio gama (GR) e o Potencial Espontâneo (SP).

Tabela 1 — Tabela com valores médios normalizados de cada perfil analisado para cada eletrofácies observada.

Designação	Código	Diagnose	Valores Médios Normalizados			Interpretação
			GR	SP	RHOB	
Evd	Verde claro	Altos valores de Raio Gama	0,64	0,20	0,07	Folhelho radioativo
Ecz	Cinza	Altos valores de densidade	-0,81	-0,98	4,55	Concreções ou cimentação Carbonática.
Evm	Vermelho	Baixos valores de densidade	0,36	-1,60	0,27	Indício de gás; matéria orgânica vegetal.
Elj	Laranja	Intermediários valores de raio gama e densidade	-1,49	-1,16	-0,96	Arenitos lamosos
Eam	Amarelo	Baixo valor de Raio Gama/ baixo valor de densidade	-0,03	0,94	-3,16	Arenitos “limpos”
Er	Rosa	Intermediário valor de raio gama/ baixo valor de densidade	-0,36	0,35	-0,91	Arenito
Em	Marrom	Baixo valor de Raio de Gama/ intermediário valor de densidade	-0,99	-0,07	0,47	Arenito

2.2.2 Eletrossequências

Os poços 7-JA-14-BA e 9-JA-12-BA foram correlacionados com base nas sucessões de eletrofácies com intuito de compreender melhor a distribuição estratigráfica dos litotipos. O estabelecimento de sucessões de eletrofácies partiu da observação de um claro padrão de relação entre as eletrofácies apoiada no comportamento das curvas de GR e SP, o que permitiu definir eletrossequências.

Neste trabalho utiliza-se o conceito de Rider (2000) para eletrossequência, que implica em um intervalo estratigráfico definido a partir de conjuntos de perfis que sejam consistentes e com características suficientemente distintas para separá-las. Em geral as eletrossequências possuem dezenas de metros e correspondem a sucessões sedimentológicas de fácies (ciclos de fácies), daí a associação com uso do termo estratigráfico “sequência”. O reconhecimento do padrão da sucessão de eletrofácies em um poço permite que, posteriormente, esses padrões sejam facilmente identificados em outros poços, facilitando inclusive a correlação entre eles. A integração de informações geofísicas e geológicas é fundamental nesta etapa.

Após o reconhecimento visual de sucessões de eletrofácies e identificação de seis eletrossequências (Quadro 4, Figura 10), tentou-se interpretá-las com base nas discussões sobre os tratos de fácies. Em seguida, comparou-se as eletrossequências com as unidades deposicionais de Caixeta (1988) (Quadro 4). O autor utiliza, dentre vários poços, os mesmos que foram trabalhados neste estudo, o que facilitou a comparação.

Eletrossequência 1. — Esta eletrossequência é principalmente reconhecida por um comportamento monótono (*shale line*) nas curvas de GR e SP, principalmente nesta (Figura 9). Representada pelo predomínio da E_{vd}, destacando-se ainda a presença da E_{cz} que mostra porções mais ricas em carbonato (presença de septárias ou cimentação carbonática). Ocorre em pacotes espessos que atingem até centenas de metros. Pode ser interpretada como a

sedimentação pelágica do lago. Não possui equivalência com as unidades deposicionais de Caixeta (1988).

Quadro 4 — Quadro síntese da associação das eletrosseqüências.

Eletrosseqüências	Sucessão de eletrofácies	Possíveis litofácies associadas	Interpretação	Unidades deposicionais (Caixeta, 1988)
1	Evd – Ecz	Lp	Sedimentação lacustre	Sem correspondência
2	Em – Eam – Evd	PC, Am, Ac, L, Al, Acc, Bi	Inundações fluviais	Unidade B
3	Elj – Evm	Ae, Aep, Ad, Aml, Adi	Processos e fluxos gravitacionais	Unidade C
4	Elj – Evd	Aml	Fluxos gravitacionais	Unidade A
5	Er – Elj	Ae, Aep, Ad, Aml, Adi	Processos gravitacionais	Unidade D
6	Elj	?	Frentes deltaicas (Caixeta, 1988)	Unidade E

Eletrosseqüência 2. — A eletrosseqüência 2 possui uma assinatura típica reconhecida no perfil de GR, no qual aparecem pequenos ciclos de afinamento e engrossamento granulométrico, o que mostra um padrão serrilhado (Figura 9). O perfil RHOB também mostra uma grande variação na curva. Predominam as eletrofácies Eam, Er e Em (que correspondem à litofácies macroclástica) intercaladas com a Evd (equivalente a litofácies microclástica) (Quadro 4). Esta eletrosseqüência representa pacotes de aproximadamente 70 metros ou menos de espessura. Interpreta-se esta eletrosseqüência como o registro de depósitos de inundações fluviais. Esta eletrosseqüência equivale à Unidade Depositional B, turbiditos em lobos, de Caixeta (1988).

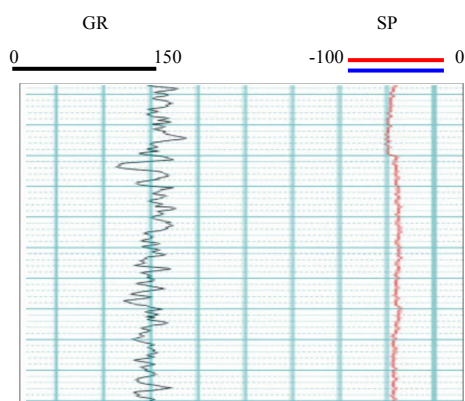
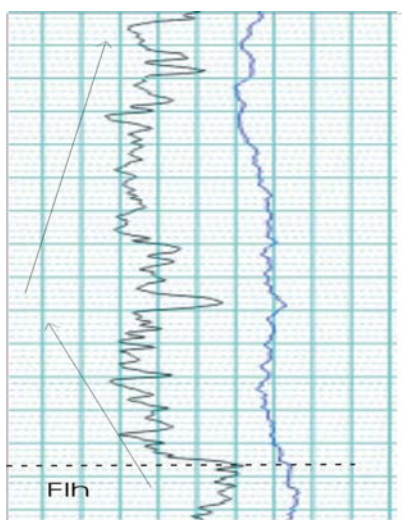
Eletrosseqüência 3. — Esta eletrosseqüência é melhor caracterizada, também no perfil de GR, apresentando uma brusca diminuição do valor deste e uma tendência de afinamento granulométrico para o topo (Figura 9). Observa-se o predomínio da Elj alcançando quase uma centena de metros. Neste caso pode corresponder às litofácies Ae, Aep, Ad, Aml e Adi. Secundariamente observa-se a Evm, que evidencia a presença de gás, o que é bastante coerente, uma vez que, esta unidade é reconhecida por Caixeta (1988) como uma das que

possui melhores rochas reservatórios. É aqui interpretada como depósitos de processos e fluxos gravitacionais. Equivale à Unidade deposicional C de turbidito canalizado (Caixeta, 1988).

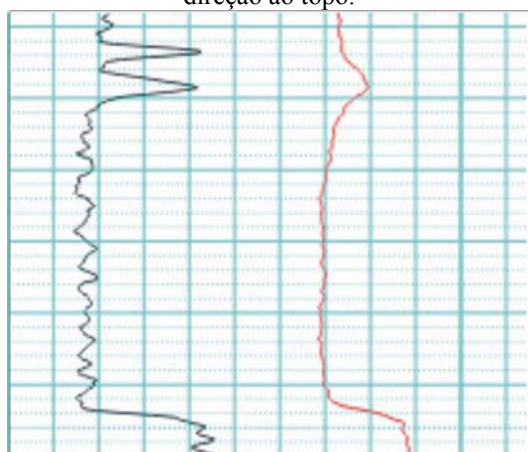
Eletrossequência 4. — A eletrossequência 4 apresenta um padrão serrilhado na curva de GR (Figura 9). Atinge aproximadamente 30 metros de espessura, é representada por um padrão de alternância entre, principalmente, as eletrofácies Elj e Evd (apesar de apresentar o mesmo padrão que a eletrossequência 2, as eletrofácies arenáceas que intercalam com a Evd são diferentes). Pode corresponder à litofácies Aml. Esta intercalação se deve ao fato de um fluxo de detritos, como foi interpretado, ser rico em material fino, que através do perfil interpreta-se como intercalações de arenito e argilito. Foi interpretada como depósito de fluxos de detritos. Equivale à Unidade Depositional A de fluxo de detritos (Caixeta, 1988).

Eletrossequência 5. — Esta eletrossequência é mais facilmente reconhecida na curva de GR por um padrão em “caixote” (Figura 9). Possui espessura de aproximadamente dezenas de metros. É composta predominantemente pela Elj e subordinadamente Em. Pode representar as litofácies Ae, Aep, Ad, Aml, Adi, tendo sido interpretada como depósito de escorregamentos e deslizamentos oriundos do colapsamento de frente deltaica. Equivale a Unidade deposicional D de Caixeta (1988).

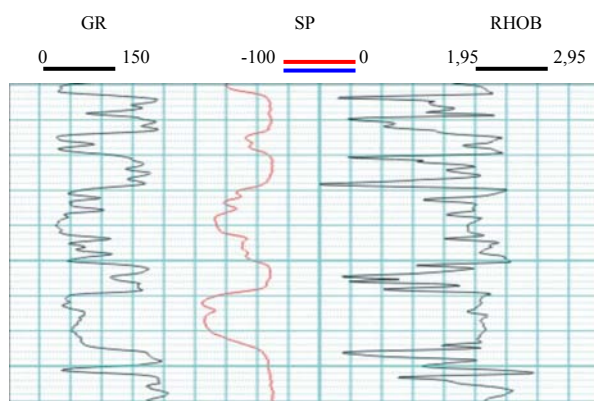
Eletrossequência 6. — A eletrossequência 6 também possui apenas informações de SP assinala um comportamento sutil de variação de valor mais alto para valores mais baixos (Figura 9). É composta da eletrofácies Elj e possui algumas dezenas de metros. Foi interpretada com apoio das informações faciológicas de Caixeta (1988), sendo interpretada pelo autor como frente deltaica *in situ*. Este depósito poderia representar, por exemplo, o olistólito que contém fácies da frente deltaica. Equivale à Unidade Depositional E de Caixeta (1988).

Eletrossequência 1 – *shale line*

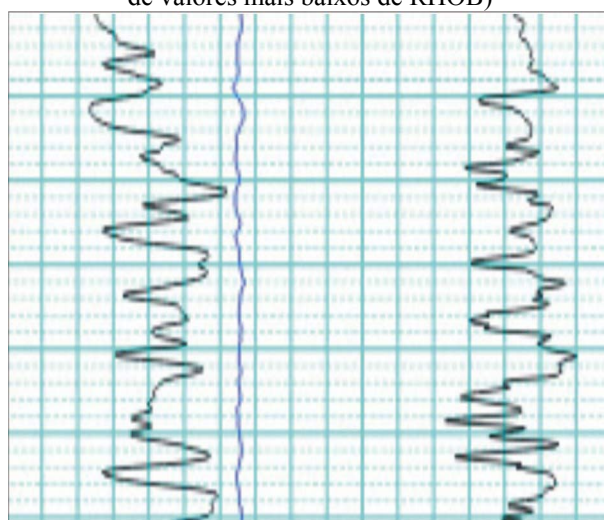
Eletrossequência 3 – contato abrupto na base e tendência de afinamento granulométrico em direção ao topo.



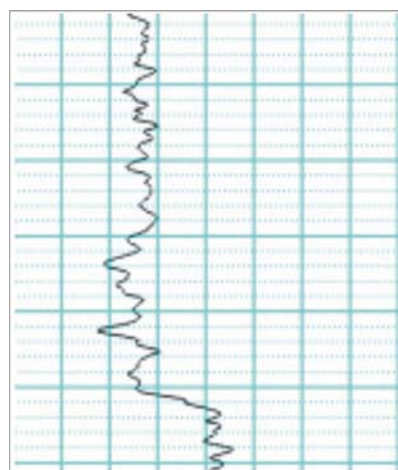
Eletrossequência 5 – padrão “caixote”



Eletrossequência 2- padrão serrilhado (observar picos de valores mais baixos de RHOB)



Eletrossequência 4 – padrão serrilhado (observar picos de valores mais altos de RHOB)



Eletrossequência 6 – suave variação na curva de GR

Figura 9 — Síntese das assinaturas nas curvas dos perfis geofísicos de cada eletrossequência.

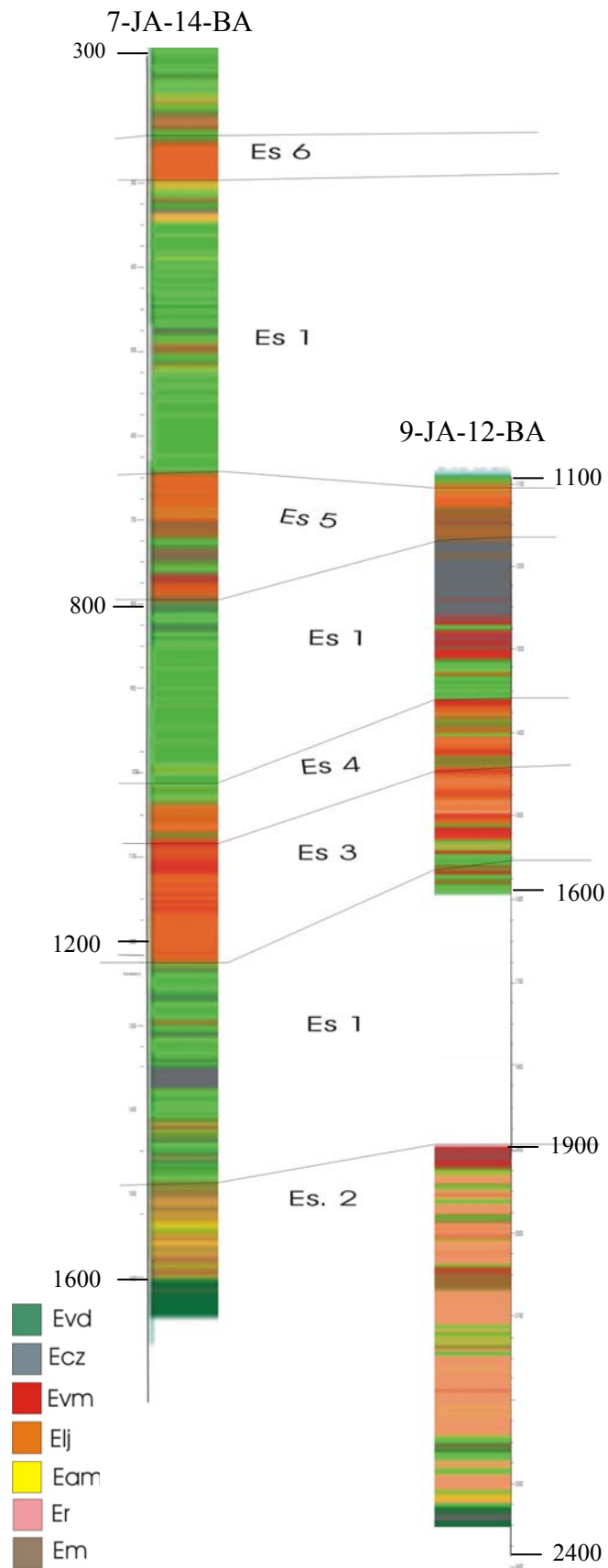


Figura 10 —Seção de correlação entre os poços 7-JA-14-BA e 9-JA-12-BA apresentando as seis eletroseqüências definidas para o campo de Jacuípe.

3 CONCLUSÃO

O estudo amplia a caracterização de fácies realizadas por Guerra (2002) e Guerra & Borghi (2003), incluindo uma abordagem de processos e mecanismos de deposição mais atual, principalmente no tocante a fluxos hiperpicnais. Isso reforça uma maior influência fluvial na acumulação de areias da Formação Maracangalha, em contextos paleoambientais de águas provavelmente mais rasas do que aventado pela literatura.

O trabalho realizou um estudo inédito de eletrofácies no campo de Jacuípe que, através da sua organização em eletrosseqüências, permitiu uma abordagem rocha-perfil mais completa. A boa correlação entre as eletrosseqüências e os intervalos estratigráficos conhecidos para o campo de Jacuípe, sugere eficácia para esse método relativamente simples de análise faciológica, sendo possível extrapolar os resultados para poços adjacentes.

A correlação alcançada entre informações sedimentológicas (paleodeposicionais) de litofácies e estratigráficas de eletrofácies abre caminho para novos estudos da arquitetura deposicional da formação, assim contribuindo para o conhecimento das heterogeneidades faciológicas dos reservatórios do sistema petrolífero Candeias–Maracangalha(!).

Referências bibliográficas

- Björklund, P. P. & Steel, R.J. 2004. Initiation of turbidite currents: outcrop evidence for Eoceno hiperpicnal flow turbidite. *Sedimentary Geology*, 165: 29-52.
- Borghi, L. 2000. *Visão Geral da Análise de Fácies Sedimentares do Ponto de Vista da Arquitetura Depositional*. Rio de Janeiro, Boletim Museu Nacional, 53:26p. (Nova Série, Geologia.)
- Caixeta, J.M. 1988. *Estudo faciológico e características de reservatórios dos arenitos produtores de gás do Campo de Jacuípe (Cretáceo inferior) Bacia do Recôncavo - Brasil*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Dissertação de Mestrado. 300p.
- Figueiredo, A.M.F., Braga, J.A.E., Zabalaga, J.C., Oliveira, J.J., Aguiar, G.A., Silva, O B., Mato, L.F., Daniel, L.M.F., Magnavita, L.P., Bruhn, C.H.L. 1994. Recôncavo Basin, Brazil: a prolific intracontinental rift basin. In: Landon S.M. (ed.) *Interior Rift Basins*. Tulsa, AAPG, p.157-203. (Memoir, n.59)
- Folk, R.L. 1980. *Petrology of sedimentary rocks*. 2.ed. Austin, Hemphill Publ. Co., 184p.
- Guerra, G.S., 2002. *Fácies sedimentares dos membros Caruaçu e Pitanga da Formação Maracangalha (Cretáceo da bacia do Recôncavo)*. Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Monografia de Graduação. 72p.
- Guerra, G.S. & Borghi, L. 2003. Fácies sedimentares gravitacionais e deformacionais da formação maracangalha e sua importância na exploração da bacia do Recôncavo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 2, Rio de Janeiro, 2003. *Anais*, Rio de Janeiro, IBP. CD-ROM, 6p.
- Lowe, D.R. 1979. Sediment gravity flows: their classification and problems of application to natural flows and deposits. In: Doyle, L.J. & Pilkey, O.H. (eds.) *Geology of continental deposits*. Tulsa, SEPM, p.75-82. (Special Publication, n.27)
- Lowe, D.R. & Guy, M. 2000. Slurry-flow deposits in the Britannia Formation (Lower Cretaceous), North Sea: a new perspective on the turbidity current and debris flow problem. *Sedimentology*, 47:31-70.
- Lowe, D.R. & Guy, M. 2003. Facies of slurry-flow deposits, Britannia Formation (Lower Cretaceous), North sea: implications for flow evolution and deposit geometry. *Sedimentology*, 50:45-80.
- Mello, U., Della Fávera J.C., Klein, G.D. 1971. Processos gravitacionais subaquosos e rochas sedimentares na parte frontal de um delta cretáceo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25, São Paulo, 1971. *Anais*, SBG, v.3, p.159-177.

- Milani, E. J. 1987. *Aspectos da Evolução Tectônica das Bacias do Recôncavo e Tucano Sul, Bahia, Brasil*. Rio de Janeiro, Petrobras. 61p. (Ciência-Técnica-Petróleo, Exploração de Petróleo, n.18)
- Mulder, T., Syvitski, J.P.M., Migeon, S., Faugeres, J., e Savoye, B. 2003. Marine hyperpycnal flows: initiation, behavior and related deposits. A review. *Marine and Petroleum Geology*, 20:861-882.
- Mutti, E., Davoli, G., Tinterri, R., Zavala, C. 1996. The importance of ancient fluvio-deltaic systems dominated by catastrophic flooding in tectonically active basin. *Mem. Sci. Geol.*, 48: 233-29.
- Mutti, E., Tinterri, R., Di Biase, D., Fava, L., Mavilla, N., Angella, S., Clabrese, L. 2000. Delta-front facies associations of ancient flood-dominated fluvio-deltaic systems. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 13:165-190.
- Mutti, E., Tinterri, R., Benevelli, G., Di Biase, D., Cavanna, G. 2003. Deltaic, mixed and turbidite sedimentation of ancient foreland basins. *Marine and Petroleum Geology*, 20: 733-755.
- Raja Gabaglia, G.P. 1990. Paleossismicidade e sedimentação – contribuição à geologia do compartimento sul da bacia do Recôncavo – BA. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado. 108p.
- Rider, M. 2000. *The Geological interpretation of well logs*. Sutherland, Whittles Publishing. 280p.
- Shanmugam, G. 2000. 50 years of the turbidite paradigm (1950s–1990s): deep-water processes and facies models – a critical perspective. *Marine and Petroleum Geology*, 17:285-342.
- Soares, J.A. 2005. Fluxo de trabalho para modelagem de eletrofácies. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 9, Salvador, 2005. *Resumos expandidos*, Rio de Janeiro, SBGf. CD-ROM, 6p.
- Serra, O. & Abbott, H.T. 1980. The contribution of logging data to sedimentology and stratigraphy. In: ANNUAL FALL TECHNICAL CONFERENCE & EXHIBITION OF THE SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS, 55, Dallas, 1980. *Anal.*, Dallas, SPE, 16p. (Artigo SPE 9270)
- Syvitski, J.P.M. & Alcott, J.M. 1995. RIVER3: Simulation of river discharge and sediment transport. *Computers and Geosciences*, 21:89-151.
- Zalán, P.V.; Rivas, A.J.P.; Herter, G.G.; Froes, C.R.; Silva, M.G. da e Camões, A.M. 1981. Estudo Faciológico dos afloramentos de Bom Despacho (BA): ritmitos e sedimentos de águas profundas associados. *Revista Brasileira de Geociências*, 11

Apêndice A – Resultados da análise petrográfica

Tabela 1 — Relação das amostras estudadas e o resultado da análise composicional.

Fácies	Amostra	Quartzo (%)	Feldspato (%)	Mica (%)	Litoclasto (%)	Intraclasto de argila	Calcilito (%)
Ab	21a	33	6	5	-	3	-
	21b	43	7	3	<1	-	<1
	23	35	8	4	3	2	
	34	45	3	1	-	4	1
	20	41	3	2	<1	5	2
Ad	24	30	6	6	-	-	-
	25	33	7	3	-	3	-
Ae	32a	50	4	2	<1	-	
	32b	52	3	<1	-	2	-
Aep	31	44	7		<1		
	30	50	8	1	1	1	
Acc	28	34	5	1	-	1	-
Al	29	46	4	<1	2	2	-
Ab	33	41	2	1	<1	3	-

Tabela 2 — Relação das amostras estudadas e o resultado da análise granulométrica.

Fácies	Amostra	Silte (%)	Areia muito fina (%)	Areia fina (%)	Areia média (%)	Areia grossa (%)	Argilosidade (%)	Cimento (%)	Porosidade (%)
Ab	21a	27	17	4	-	-	25	2	20
	21b	17	31	6	<1	-	20	6	15
	23	15	25	8	--	-	??	5	15
	34	8	22	19	3	-	24	8	14
	20	14	29	3	-	-	11		23
Ad	24	9	26	6	--	-	14	6	15
	25	10	22	6	<1	-	25	5	13
Ae	32b	16	21	16	2	-	30	-	14
	32a	9	28	19	-	-	16	8	15
Aep	31	4	14	27	7		25	10	12
	30	9	21	28	1	<1	16	13	7
Acc	28	23	14	3	-	-	36	3	11
Al	29	13					25		
Ab	33	7	17	20	5	-	30	5	12

Apêndice B – Caracterização das litofácies

1 Fácies PC – Paraconglomerado

(Figura b, Estampa II, Apêndice C)

Diagnose – Paraconglomerado monomítico, maciço (embora localmente insinue-se orientação), acinzentado, composto por intraclastos de folhelho de tamanho centimétrico (seixos) arredondados a angulosos, imersos em matriz constituída de areia fina superior. Ocorre em camada de porte médio e apresenta contato superior nítido e inferior erosivo.

Interpretação – Fluxo de detritos (granular) não-coesivo.

Discussão – A fácies PC foi identificada apenas no ponto 3 (Ilha de Maré), ocorrendo abaixo de uma camada da fácies Am.

Mutti *et al.* (2000, 2003) descrevem situação semelhante interpretando o depósito como congelamento por fricção de fluxos cascalhosos no sistema de leque deltaico dominado por inundação catastrófica fluvial em sedimentos do Grupo Santa Liestra, Eoceno inferior da Espanha. Resultaria da expansão (desconfinamento) de um fluxo gravitacional subaquoso associado a evento de inundação catastrófica. Este depósito foi considerado proximal, produto de uma corrente bipartida sustentada pela inundação fluvial em que inicialmente, há uma movimentação inicial mais rápida do fluxo hiperconcentrado (granular) através de vários pulsos. Este fluxo acelera ao longo da região em que está confinado e, ao entrar num corpo aquoso “estagnado”, sofre desconfinamento e diluição e a conseqüente perda de sustentação, causando a deposição súbita dos clastos mais grossos.

Observa-se no topo desta camada seixos de folhelhos orientados no contato com a camada subjacente que pode ser o produto da remobilização dos clastos por meio de tração pela passagem do fluxo que ainda continua. Neste processo ocorrem peneiramento e

concentração dos clastos, gerando, em determinada situação, imbricação.

Não fica claro no afloramento se os seixos de intraclasto que compõem a fácies derivam da erosão da planície fluvial ou se são provenientes da erosão do substrato do lago.

A fácies PC foi descrita em um bloco (olistólito) composto por fácies predominantemente arenosa que sofreu escorregamento (*slump*). O trato de fácies ao qual pertence registra uma sedimentação mais próxima à desembocadura do rio em relação às demais observadas em outros afloramentos da Formação Maracangalha.

2 Fácies A1 - Arenito com laminação plano-paralela

(Figura b, Estampa I; figura a, Estampa V, Apêndice C)

Diagnose – Arenito muito fino superior, moderadamente a pobremente selecionada, com laminação plano-paralela e coloração cinza-amarelada. As camadas variam de pequeno a médio porte e possuem contato nítido e erosivo na base.

Interpretação – Tração sob regime de fluxo superior com formação de leito plano.

Discussão – Ocorre no olistólito do ponto 3 (Ilha de Maré) e, com bastante frequência, nos pontos 5 (Praia de Bom Despacho) e 4 (Ponta da Sapoca).

Petrograficamente é classificada como um Quartzo-arenito (Folk, 1974) observou-se que os contatos entre os grãos são do tipo reto e côncavo-convexo. A porosidade visual média é de 12%, predominando a porosidade intergranular e secundariamente, as porosidades intragranular e móldica. Destaca-se a grande quantidade de quartzo com sobrecrecimento. A maioria dos grãos possui um *coating* de argila em seu entorno e também ocorre a presença de óxido de ferro. Por vezes pode aparecer, associadas a esta fácies estruturas convolutas.

Equivale à Fácies 4 de Mutti *et al.* (1996); ao intervalo B2 da sequência de fácies de sistema misto do tipo-B de Mutti *et al.* (2003); ou a Fácies 5(Td) de Guerra & Borghi (2003), que associaram tais depósitos à inundações fluviais catastróficas.

Os fluxos hiperpicnais tendem a formar um perfil granulométrico granocrescente — granodecrescente, isto é, resulta da aceleração—desaceleração da inundação. A fácies representa o pico (clímax) da inundação, que todavia possui baixo potencial de preservação devido a erosão subsequente.

Na base da fácies Al ocorreu a deposição de grãos até grânulo. O topo desta camada, como acontece muito bem exposto no ponto 5, apresenta um contato erosivo com a fácies Acc (aqui interpretada como sendo gerada durante a desaceleração da inundação). Estes depósitos exemplificam muito bem a diferença entre turbiditos clássicos e hiperpicnitos, como aqui aceitos.

3 Fácies *Ac* - Arenito com estratificação cruzada acanalada

(Figura d, Estampa II, Apêndice C)

Diagnose – Arenito fino a médio, moderadamente selecionado, amarelado, com estratificação cruzada acanalada, ocorrendo em camada de porte médio. Contato inferior erosivo e superior nítido.

Interpretação – Migração de mesoformas de leito (megaondulações) por um processo trativo subaquoso sob regime de fluxo inferior.

Discussão – Esta fácies foi descrita apenas no ponto 3 (Ilha de Maré) e localmente apresenta no topo da camada estrutura em chama. Relaciona-se com a fácies Am₃ que a sucede em sucessão verticalmente.

É interpretada como a migração de megaondulações de crista sinuosa em regime de fluxo inferior de acordo com Harms *et al.* (1982). Segundo Mutti *et al.* (2003), esta fácies pode ser interpretada como o estágio inicial da deposição de um evento de inundação catastrófica na porção proximal de um sistema flúvio-deltaico. Para estes mesmos autores, quando a descarga hiperpicnal é eficiente, um fluxo denso deposita areias maciças que são

reelaboradas por fluxos turbulentos, que se lhe associam. Tal processo começa a formar as formas de leito trativas.

4 Fácies *Acc* - Arenito com laminação cruzada cavalgante

(Figura a, Estampa I; figura a, Estampa III, figura b, Estampa V, Apêndice C)

Diagnose – Siltito a arenito muito fino, argiloso, moderadamente selecionado, com laminação cruzada cavalgante. Geralmente apresenta contato erosivo na base gradacional e nítido no topo. Ocorrem, em geral, em camadas de porte médio.

Interpretação – Migração clino-ascendente de microformas de leito (ondulação) por fluxo trativo combinado com decantação, em regime de fluxo inferior.

Discussão – Esta fácies está bem exposta nos pontos 1 (Ilha do Frade), 4 (Ponta da Sapoca) e 5 (Praia de Bom Despacho), sendo comum a ocorrência de matéria orgânica vegetal dispersa ou concentrada em lâminas. No ponto 1, é comum que essa fácies apareça com estrutura em chama no topo. Pode, ainda, conter falhas sin-sedimentares de pequeno rejeito e estruturas de carga (bola-e-almofada) e até pseudonódulos.

Petrograficamente é classificada como Subarcóseo com argilosidade aproximada de 30%. Observa-se que há filmes de argila associados às estruturas. Possuem uma porosidade visual que varia em torno de 15%, sendo principalmente intergranular e subordinadamente, intragranular e móldica.

Em camadas da fácies *Acc* muito bem expostas na Ilha do Frade, é marcante a variação do ângulo de cavalgamento (críticos, subcríticos e supercríticos) alternados no mesmo depósito mostrando variação da capacidade de transporte do fluxo.

Outro aspecto marcante é a espessura decimétrica (aproximadamente 30 cm) das camadas o que permite supor correntes turbulentas “quase-estático” (*cf.* Kneller, 1995). Devido à quantidade de sedimentos finos experimentando processos de tração e decantação, as

laminações cruzadas cavalgantes possuem filmes de argila depositados intercalados com as estruturas. Esses “pentes” de argila, como podem ser chamados, ficam depositados no *stoss-side*, mostrando que, junto ao processo de tração, aparentemente ocorria queda de finos na parte frontal da estrutura após a passagem do fluxo turbulento. Ainda pode-se identificar superfícies erosivas internas e mudanças na granulometria refletindo variações temporais na velocidade do fluxo dentro de um mesmo evento, como se pode observar pela descontinuidade da superfície erosiva e a constância do tamanho do grão abaixo e acima da superfície. Segundo Mulder *et al.* (2003) estas seqüências podem ser truncadas na base devido a erosão por fluxos de alta velocidade desenvolvidos durante o ápice da inundação de mais alta magnitude, ou seja, uma variação de energia entre intervalos das cheias. Desta forma, os depósitos podem ser erodidos pelo próximo período de aumento da descarga entre eventos de período de decréscimo da descarga (Mulder *et al.*, 2003). Estruturas sedimentares trativas e base erosiva podem refletir a erosão de fluxo turbidítico (Hiscott *et al.*, 1997 *apud* Björklund & Steel, 2004). O alto teor da argilosidade descrita petrograficamente pode ser resultado do esmagamento de clastos (grãos) de argila segregados durante o fluxo.

Os fluxos hiperpicnais carregam sedimentos continentais para um corpo aquoso; portanto, tanto o volume como a preservação de matéria orgânica é diferente das encontradas em fluxos turbidíticos. A abundância de fragmentos vegetais sugere assim a uma entrada fluvial (Björklund & Steel, 2004). Na fácies Acc é muito comum a presença dessa matéria orgânica vegetal e em alguns casos muito bem preservada.

Para Mulder & Alexander (2001) as laminações cruzadas cavalgantes podem ser consideradas como uma das características marcantes dos fluxos hiperpicnais, já que representam a migração constante de formas de leito sedimentares, enquanto que o suprimento sedimentar é mantido e a taxa de sedimentação é significativa.

5 Fácies Ad – Arenito deformado

(Figura b, Estampa III; figura a, Estampa IV, figura c, Estampa V, Apêndice C)

Diagnose – Arenito muito fino lamoso, pobremente selecionado, com estruturas deformacionais dúcteis, tais como dobras convolutas, falhamentos sinsedimentares e intraclastos de arenito arredondados rotacionados, e abundantes fragmentos de matéria orgânica vegetal. Ocorrem em camadas de porte muito grande com contatos inferior e superior indefinidos.

Interpretação – Ressedimentação decorrente de escorregamento (*slump*).

Discussão – Esta fácies está melhor exposta nos pontos 1 (Ilha do Frade) e 3 (Ilha de Maré), compondo um corpo de dimensões métricas desorganizado internamente, podendo este ser chamado de olistostroma. O termo olistostroma [*olistomai*= deslizar; *stroma*=camada] é usado para designar um pacote de sedimentos que escorregou em estado de semifluidéz acumulando-se em uma massa caótica de sedimento. Equivale à fácies Ad de Guerra & Borghi (2003) e pode ser considerada aproximadamente à fácies “Arenito com estratificação cruzada tangencial e escorregamentos” de Caixeta (1988) e à fácies B de Raja Gabaglia (1990).

Petrograficamente classifica-se como um Subarcóseo (Folk, 1974), argilosidade média de 15%, porosidade visual média de 15% (predominantemente intergranular). Ocorre cimentação carbonática de aproximadamente 5%.

Num olistostroma, a evolução do processo de escorregamento pode incorporar água e geram fluxos gravitacionais ora mais argiloso, ora mais arenoso, permitindo novos depósitos, como será visto mais adiante. Nas porções em que a presença de argila é maior, o depósito tem caráter mais dúctil em relação àquelas mais arenosas, que tem comportamento mais rúptil (*cf.* Guerra, 2002). Estruturas como dobras convolutas são evidências típicas do primeiro, enquanto, falhas do último.

A transição de mecanismos dúctil para rúptil, envolve algumas estruturas que apresentam forma colunar, assemelhando-se a diques de areia (ou *pillars*, como até então eram reconhecidas essas estruturas por autores que estudaram essas areias anteriormente), porém aqui, essas estruturas são reinterpretadas como do tipo *tension gashes*. Quando o fluxo entra no campo da deformação rúptil, ou seja, nas porções com maiores teores de areia, formam-se falhas sin-sedimentares de pequeno rejeito. Assim, a fácies Ad pode evoluir para as fácies Adi, como será visto abaixo.

Essas diferenças no fluxo descrevem as transformações pelas quais passa durante o processo de escorregamento; por isso, a importância de se distinguirem da melhor forma possível fácies, numa tentativa de se conseguir cada vez mais entender o comportamento desses fluxos em distintos sítios deposicionais na bacia.

Esta fácies define uma escala estratal de um processo gravitacional de escorregamento que pode ser avaliado em escalas maiores.

6 Fácies *Adi* – Arenito deformado imbricado

(Figuras b e c, Estampa IV, Apêndice C)

Diagnose – Arenito fino lamoso, pobremente selecionado, com falhas de cisalhamento (horizontais) e de cavalgamento (“imbricação”), e fragmentos de matéria orgânica vegetal. Ocorrem em camadas de porte muito grande com contatos inferior e superior indefinidos.

Interpretação – Depósito por congelamento retrogradacional de um fluxo de detritos arenoso.

Discussão – Esta fácies foi descrita apenas no ponto 3 (Ilha de Maré).

O fluxo de detritos arenoso é definido por Shanmugam (2000) como uma posição intermediária entre os fluxos de grãos (pressão dispersiva) e o fluxo de detritos argiloso (força da matriz) que já podem ser desenvolvidos a partir de 2% de matriz (estudos experimentais de

Hamptom, 1975 *apud* Shanmugam, 2000).

Está inserida no contexto de escorregamento da frente deltaica e caracteriza uma parte do escorregamento, onde o fluxo adquirindo maior quantidade de sedimentos arenosos forma um fluxo de detritos arenoso que depositou esta fácies. O fluxo é caracterizado pela presença de cisalhamentos internos, cujo depósito apresenta estruturas, que muitas vezes podem ser mal-identificados como laminações plano-paralela (Shanmugam, 2000). Portanto, encontram-se essas estruturas cisalhadas também associadas as estruturas tais de *tension gashes* e a formação de *sand fish* que mostram condição de movimento.

Com o fluxo continuando sua evolução, os depósitos podem ocorrer a partir do congelamento da porção frontal do fluxo de forma retrogradacional. A porção a montante do fluxo “quebra” e acaba por ocorrer sucessivos cavalgamentos das “fatias” do fluido (Shanmugam, 2000). Tal “imbricação” sugere um movimento compressional (atectônico advindo da movimentação da cauda do fluxo). Aparentemente o produto final se assemelha com a estrutura em *duplex* da Geologia Estrutural que é formado por uma tectônica ativa.pode vir a se depositar por um processo de congelamento.

7 Fácies Ae – Arenito com escape de fluido (Guerra, 2002 e Guerra & Borghi, 2003)

(Figura e, Estampa III, figura d, estampa V, Apêndice C)

Diagnose - Arenito muito fino, lamoso, moderado à pobremente selecionado, maciço ou com estruturas de escape de fluido, tal como pilar.

Interpretação – Fluxo liquefeito/fluidizado.

Discussão – Esta fácies é pouco freqüente sendo identificada apenas no ponto 1 (Ilha do Frade).

Petrograficamente é classificada como um Quartzo-arenito (Folk, 1974), é composta

predominantemente por areia muito fina, argilosidade média de 16%, e possui uma porosidade visual média de 12% ocorrendo sob a forma intragranular, intergranular, de encolhimento e móldica. Ocorrem contatos frouxos, côncavo-convexo e raramente suturados.

O aspecto maciço do arenito, por vezes apresentando estrutura de escape de fluido é normalmente interpretado como fluxos liquefeitos (Lowe, 1982 *apud* Guerra & Borghi, 2003), que podem ser iniciados tanto por deslizamento, seguidos de liquefação (entrada de água no sistema) ou por liquefação espontânea (sismos) (Arienti, 1996 *apud* Guerra, 2002). As estruturas de escape de fluido formar-se-iam no estado final de deposição ou imediatamente após, pela liberação de grande quantidade fluido intersticial do fluxo em movimento ascendente, que perturbaria a trama da rocha. O processo gerador desta possui pequena capacidade de transporte de sedimentos.

8 Fácies *Aep* – Arenito com estrutura em prato

(Figuras c e d, Estampa III, figura e, Estampa V, Apêndice C)

Diagnose – Arenito fino a muito fino, amarelado, moderadamente selecionado, com estruturas de escape de fluido em prato. Ocorrem em camada de porte médio.

Interpretação – Abundante escape de fluido intersticial durante ou após a deposição de areias para fluxos liquefeitos.

Discussão – Esta fácies foi observada apenas no ponto 1 (Ilha do Frade) estando inserida num bloco isolado.

Petrograficamente classifica-se como um Subarcóseo (Folk, 1974), é composta por areia fina, argilosidade média de 20%, possui cimentação carbonática de aproximadamente 10% e porosidade média de 10%.

Juntamente à camada desta litofácies podem observar-se feições semelhantes a estruturas plano-paralela ou acamamento, mas com caráter descontínuo e por vezes ondulado.

Estariam relacionados ao cisalhamento interno ocorridos durante a movimentação de um fluxo laminar, na qual a segregação dos grãos ou orientação dos mesmos gera descontinuidades na rocha. As estruturas em prato se formam pelo abundante escape de fluido intersticial imediatamente após deposição de areias por fluxos plásticos liquefeitos.

Neste mesmo bloco, acima das estruturas em prato, há uma camada composta por arenitos finos à médios com base ondulada e topo não observado, na qual ocorrem concentrações de arenitos grossos nas cavas. Estas ondulações são resultados da diferença de velocidade entre dois fluxos modificando a superfície limitante, tal qual ocorre no contato água-ar sob ação de ventos. A formação e preservação desta feição são geradas por fluxos em movimento de longa duração, como ocorrem em eventos de inundação.

9 Fácies *Am* – Arenito maciço

(Figura c, Estampa II, Apêndice C)

Diagnose – Areia fina superior, maciça e de coloração amarela. Ocorre em camadas de porte métrico.

Interpretação – Depósito de um fluxo granular (fluxo de detritos arenoso)

Discussão – Esta fácies foi descrita apenas no ponto 3 (ilha de Maré) ocorrendo dentro do olistólito, em contato inferior com a fácies PC e superior com a Ac. Segundo Mutti et al. (2003), esta fácies é o produto da deposição por um fluxo denso (fluxo granular arenoso) que, após depositar a fácies PC sofre fricção na sua porção basal, pelo fundo do lago com perda de cisalhamento interno por escape de água.

10 Fácies *Aml* – Arenito lamoso maciço

(Figura d, Estampa IV, Apêndice C)

Diagnose – Arenito muito fino, lamoso, moderadamente selecionado, maciço, com

abundante presença de intraclastos de argila e fragmentos de material orgânico vegetal centimétricos. Ocorre em camadas de porte grande.

Interpretação – Depósito de fluxo de detritos (*debris flow*).

Discussão – Ocorre melhor exposta no ponto 2 (Madre de Deus). Esta fácies também compõem parte do corpo de olistostroma.

Equivale à fácies “Arenito silto-argiloso” de Caixeta (1988) e à fácies Am de Guerra (2002) e Guerra & Borghi (2003).

Lowe (1979) definiu depósitos como este como sendo fluxos saturados em água que depositam sedimentos *en masse* quando a tensão cisalhante fica abaixo do campo de esforços dos detritos.

A fácies Aml é facilmente identificada pela sua isotropia interna com completa ausência de estruturas sedimentares, o que resulta numa aparência de “cerebróide” em campo. Nestes depósitos também ocorrem *pillars* discretos. Interpreta-se como o resultado de um fluxo de detritos (*debris flow*) que é mantido pelo empuxo da matriz lamosa coesa, possivelmente evoluído de escorregamentos provenientes da instabilidade da frente deltaica. Essa evolução se dá a partir da entrada de água no sistema e é também a entrada de água no sistema que permite a formação de estruturas de escape de fluido, mesmo que “tímidas”.

11 Fácies Ab - Arenito bandado

(Figura e, Estampa II, figura f, Estampa V, Apêndice C)

Diagnose – Siltito à arenito muito fino inferior, pobremente selecionado, coloração de cinza a verde e com bandamentos internos de granulometria mais fina (argilosa). Ocorrem fragmentos de matéria orgânica e intraclastos de argila. Podem ocorrer acima de um arenito maciço e abaixo da deposição de camadas com intraclastos orientados.

Interpretação – Fluxos gravitacionais do tipo *shurry*.

Discussão – A fácies tem suas melhores exposições nos pontos 3 (Ilha de Maré) e 1 (Ilha do Frade).

Petrograficamente é classificado como um Subarcóseo (Folk, 1974) e argilosidade aproximada de 20%. Observou-se contatos entre os grãos são do tipo pontual e frouxo, a porosidade visual de aproximadamente 17%, sendo esta principalmente intergranular, mas também ocorrendo as do tipo intragranular, móldica e de encolhimento. Diferentemente da maioria das outras amostras analisadas esta contém pouquíssimos quartzos com sobrecrecimento. Há presença de litoclastos metamórficos, sendo comum observar a orientação das micas indicando direção de fluxo. Nas porções argilosas, há maior concentração de cimentação carbonática e presença de feldspatos enquanto nas porções menos argilosas a oxidação de ferro é mais relevante.

Lowe & Guy (2000, *et seq.*) descrevem na Formação Britannia (Cretáceo Inferior, localizado no Mar do Norte) o processo de *slurry* como aqueles em que se pode sugerir comportamentos tanto coesivo quanto turbulento, sendo fluxos sedimentares argilosos ricos em areia e são transicionais entre a parte terminal de uma corrente turbidítica e os fluxos de detritos coesivos. Os arenitos estudados por Lowe & Guy (2000, *et seq.*) são muito semelhantes visualmente e texturalmente com as rochas da Formação Maracangalha.

Porém, Mutti *et al.* (2003) interpretam esta fácies como o produto da queda de sedimentos na ausência de um processo trativo efetivo, onde uma pluma, de um fluxo hiperpicnal diluído, rica em sedimentos sílticos parece ser o processo mais plausível para esta sedimentação. A diferença entre estas duas interpretações está na caracterização do evento, uma vez que no primeiro interpreta-se um evento para cada par de areia/argila, enquanto no segundo tem-se um evento único.

12 Fácies Bi – Brecha intraclástica

(Figura e, Estampa I, Apêndice C)

Diagnose – Brecha composta por folhelho cinza escuro fissil, com abundantes injeções de diques e lâminas irregulares. A matriz é constituída de areia predominantemente fina. Apresenta contato inferior do tipo irregular e superior erosivo.

Interpretação – Desagregação do substrato lamoso após a passagem de um fluxo gravitacional arenoso com injeção de areia no substrato.

Discussão – Esta fácies foi descrita apenas no ponto 5 (Praia de Bom Despacho). É um depósito formado praticamente *in situ*, com pequena movimentação lateral, durante a passagem de um fluxo gravitacional subaquoso que, devido à sua carga, atrito e à sua velocidade, desloca e fragmenta o substrato argiloso injetando areia nos espaços formados. Trata-se de um mecanismo autoclastico de desagregação de folhelho, não identificado na literatura geral sobre fluxos gravitacionais.

13 Fácies L – Lamito maciço ou laminado

Diagnose – Lamito siltico cinza com estrutura maciça.

Interpretação – Decantação de um fluxo “quase-estático” da porção terminal de fluxos turbulentos de baixa densidade.

Discussão – A melhor exposição dessa fácies está no ponto 4 (Ponta da Sapoca), mas também no ponto 5 (Praia de Bom Despacho).

Esta fácies equivale à Fácies 6 de Mutti *et al.* (1996); do intervalo B4 e B5 do sistema misto do tipo B de Mutti *et al.* (2003); e à Fácies 6 de Guerra & Borghi (2003), e associa-se à fácies Acc.

Segundo Mutti *et al.* (2003), esta fácies representa a sedimentação final de um fluxo hiperpicnal, onde começa haver um enfraquecimento do fluxo com decantação e uma cauda de fino é depositada já numa fase “quase-estática” do fluxo turbidítico de baixa densidade,

sendo este o último evento de deposição do fluxo

No ponto 4 identifica-se facilmente uma feição canalizada onde lateralmente ocorrem lamitos e arenitos desconfinados.

14 Fácies *Lp* - Lamito pelágico (Guerra, 2002 e Guerra & Borghi, 2003)

(Figura d, Estampa I, Apêndice C)

Diagnose – Lamitos argilosos de cor cinza escura a preta com acamamentos muito delgados. Apresentam-se em camadas que variam de decimétricas a métricas.

Interpretação – Decantação de finos em baixa energia em ambiente redutor.

Discussão – Esta fácies pode ser encontrada em camadas métricas, como está bem exposto nos pontos 4 (Ponta da Sapoca) e 5 (Praia de Bom Despacho) ou ainda com alguns centímetros, como no caso no ponto 5. Localmente pode apresentar estruturas deformacionais como dobras e falhas e, ainda, injeções de areia que alcançam até 1m, formadas a partir de sobrecarga dos folhelhos em camadas sobrepostas. Os diques de areia são “ejeções” (ascensional) ou, mais raramente, “injeções” (descensional) de sedimentos inconsolidados, liquefeitos, discordantes, ortogonal ou obliquamente aos estratos hospedeiros (Raja Gabaglia, 1990). Também podem apresentar concreções carbonáticas (septárias) métricas.

Equivale à fácies homônima de Guerra & Borghi (2003), sendo interpretada como a deposição de sedimentos finos, ou seja, sedimentação lacustre *background*.

Na observa-se uma superfície de deslocamento (250° SE) onde a porção inferior está deformada (dobras), esta superfície pode ter sido gerada durante algum episódio de escorregamento motivado por algum abalo sísmico.

Zalán *et al.* (1981) comparando o mergulho estrutural da bacia com mergulho dessas exposições, e sabendo que esses afloramentos são cortados por falhas de pequeno rejeito formando *horst* e *grabens*, entenderam que os folhelhos do afloramento à direita do Terminal

de Bom Despacho estão estratigraficamente acima das camadas arenosas do ponto 5. Este dado nos permite interpretar uma possível variação do nível do lago onde, os depósitos de hiperpicnitos que são de água rasa, possivelmente de plataforma média, estão abaixo de muitos metros de sedimentação lacustre de *background*. Estas possíveis variações só podem ser confirmadas com estudo de rocha em subsuperfície.

Apêndice C – Estampas de ilustração

Estampa I

- a) *Fácies Acc.* Observar filmes de argila depositados entre as estruturas de laminação cruzada cavalgante resultante de processos de decantação e tração. Praia de Bom Despacho (Ilha de Itaparica).
- b) *Fácies Al.* Observar na camada laminação plano-paralela, escavada por laminação cruzada cavalgante, indicando variação de energia no mesmo evento. Praia de Bom Despacho (Ilha de Itaparica).
- c) *Fácies Acc.* A presença de matéria orgânica vegetal chama atenção pelo seu grau de preservação e abundância, levando a crer que esse material foi transportado e depositado não muito distante de sua fonte. Praia de Bom Despacho (Ilha de Itaparica).
- d) *Fácies Lp.* Observar concreção carbonática no topo do folhelho e injeção de arenito atravessando a rocha. Praia de Bom Despacho (Ilha de Itaparica).

Estampa II

- a) Olistólito, à esquerda, contendo o sub-trato de fácies proximal de um sistema flúvio-deltaico dominado por inundação catastrófica, rotacionado dentro do corpo de olistostroma, à direita. Ilha de Maré.
- b) *Fácies PC.* Ilustração da fácies depositada a partir do congelamento basal de um fluxo denso. Ilha de Maré
- c) *Fácies Am.* Ilustração da fácies depositada a partir da diminuição da energia por cisalhamento interna e escape de água. Ilha de Maré.
- d) *Fácies Ac.* Ilustração da fácies interpretada como o registro de megaondulações formadas a partir de regime de fluxo inferior. Ilha de Maré.
- e) *Fácies Ab.* pode ter sido depositada a partir de fluxos de *slurry* ou a partir da decantação da pluma deltaica formando pares de areia/argila.
- f) A figura chama a atenção para a quantidade e preservação de material continental associado ao sub-trato de fácies proximal. Neste local foi encontrado âmbar. Ilha de Maré.

Estampa III

- a) *Fácies Acc.* Observa-se a variação do ângulo de cavalgamento das laminações cruzadas cavalgantes, a presença de argilosidade proveniente de pelotas de argila e a acumulação em lâminas e a preservação de matéria orgânica continental. Ilha do Frade.
- b) *Fácies Ad.* Ilustração da fácies mostrando o porte das camadas originadas por processos gravitacionais de escorregamento. Ilha do Frade.
- c) Visão geral do bloco que contém a fácies *Aep* e a presença de uma superfície ondulada bem marcada acima da fácies. Ilha do Frade.
- d) *Fácies Aep.* Observar a marcante abundância de estruturas em prato. Ilha do Frade.
- e) *Fácies Ae.* Observar aspecto geral da fácies com a presença de estruturas em pilares. Ilha do Frade.

Estampa IV

- a) *Fácies Ad.* Aspecto geral da fácies onde é possível observar divisões de fluxo e intrcalstos de arenito rotacionados. Ilha de Maré.
- b) *Fácies Adi.* Observar as feições lineares e os truncamentos de *tension gashes* por elas. Ilha de Maré.
- c) *Fácies Adi.* Observar as estruturas de cavalgamento (imbricação) no arenito, quando derivado de congelamento. Ilha de Maré.
- d) *Fácies Aml.* Aspecto de campo no qual é marcante a característica “cerebróide” da fácies. Madre de Deus.

ESTAMPA V

- (a) *Fotomicrografia da litofácies Al.* Observar a concentração de cimentação carbonática e a boa porosidade da amostra (Nicóis paralelos; 2,5x).
- (b) *Fotomicrografia da litofácies Acc.* Observar a grande quantidade de material argiloso, que como discutido no Apêndice B, pode ser resultado do esmagamento de grãos de argila (Nicóis paralelos; 2,5x).
- (c) *Fotomicrografia da litofácies Ad.* Aspecto geral da lâmina (Nicóis paralelos; 2,5x).
- (d) *Fotomicrografia da litofácies Ae.* Observar a cimentação carbonática desenvolvida em regiões de maior concentração de grãos mais grossos (Nicóis cruzados; 2,5x).
- (e) *Fotomicrografia da litofácies Aep.* Observar a cimentação carbonática e a porosidade obstruída por argila (provavelmente por desagregação de feldspato). (Nicóis paralelos; 2,5x).
- (f) *Fotomicrografia da litofáciess Ab.* Aspecto geral da amostra analisada. Observar a quantidade de óxido de Ferro (Nicóis paralelos; 2,5x).

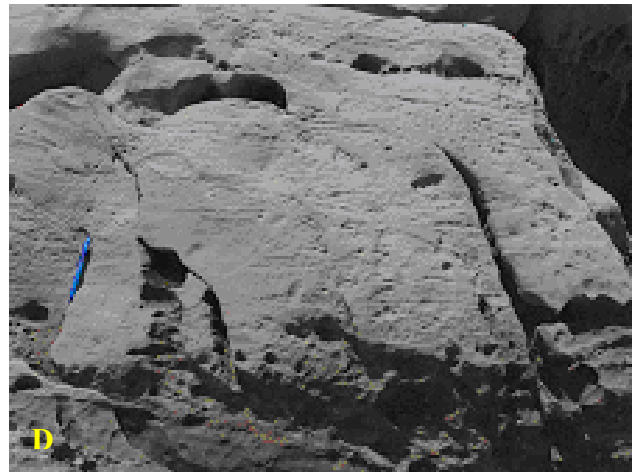
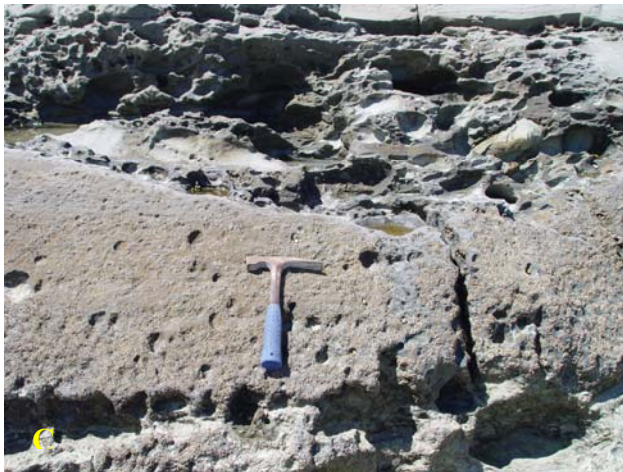
ESTAMPA I



ESTAMPA II

- (a) Olistólito, à esquerda, contendo o sub-trato de fácies proximal de um sistema flúvio-deltaico dominado por inundação catastrófica, rotacionado dentro do corpo de olistostroma, à direita. Ilha de Maré.
- (b) *Fácies PC*. Ilustração da fácies depositada a partir do congelamento basal de um fluxo denso. Ilha de Maré
- (c) *Fácies Am₂*. Ilustração da fácies depositada a partir da diminuição da energia por cisalhamento interna e escape de água. Ilha de Maré.
- (d) *Fácies Ac*. Ilustração da fácies interpretada como o registro de megaondulações formadas a partir de regime de fluxo inferior. Ilha de Maré.
- (e) *Fácies Ab*. pode ter sido depositada a partir de fluxos de *slurry* ou a partir da decantação da pluma deltaica formando pares de areia/argila.
- (f) A figura chama a atenção para a quantidade e preservação de material continental associado ao sub-trato de fácies proximal. Neste local foi encontrado âmbar. Ilha de Maré.

ESTAMPA II



ESTAMPA III

(a) *Fácies Acc.* Observa-se a variação do ângulo de cavalgamento das laminações cruzadas cavalgantes, a presença de argiloidade proveniente de pelotas de argila e a acumulação em lâminas e a preservação de matéria orgânica continental. Ilha do Frade.

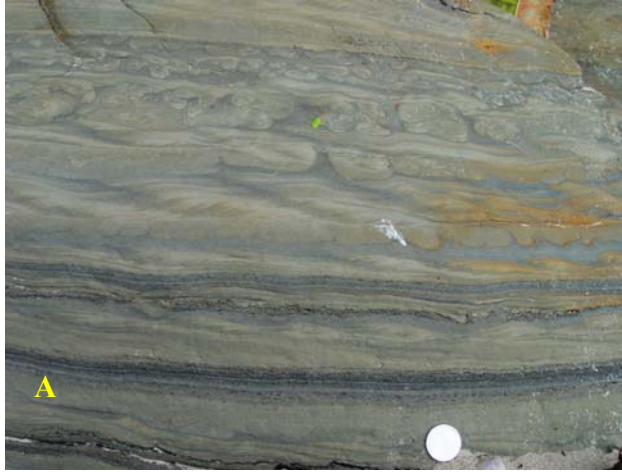
(b) *Fácies Ad_{(d)/(r)}*. Ilustração da fácies mostrando o porte das camadas originadas por processos gravitacionais de escorregamento. Ilha do Frade.

(c) Visão geral do bloco que contém a fácies *Aep* e a presença de uma superfície ondulada bem marcada acima da fácies. Ilha do Frade.

(d) *Fácies Aep*. Observar a marcante abundância de estruturas em prato. Ilha do Frade.

(e) *Fácies Ae*. Observar aspecto geral da fácies com a presença de estruturas em pilares. Ilha do Frade.

ESTAMPA III



ESTAMPA IV

- (a) *Fácies Ad.* Aspecto geral da fácies onde é possível observar divisões de fluxo e intracalstos de arenito rotacionados. Ilha de Maré.
- (b) *Fácies Adi.* Observar as feições lineares e os truncamentos de *tension gashes* por elas. Ilha de Maré.
- (c) *Fácies Adi.* Observar as estruturas de cavalgamento (imbricação) no arenito, quando derivado de congelamento. Ilha de Maré.
- (d) *Fácies Aml.* Aspecto de campo no qual é marcante a característica “cerebróide” da fácies. Madre de Deus.
- (e) *Fácies Ae.* Observar aspecto geral da fácies com a abundante presença de estruturas em pilares. Ilha do Frade.

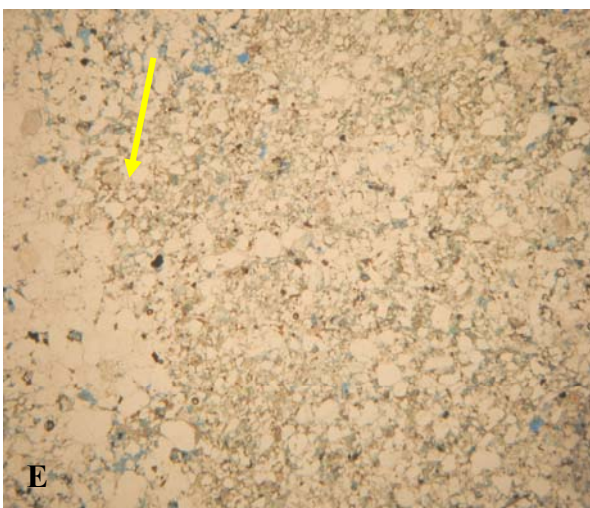
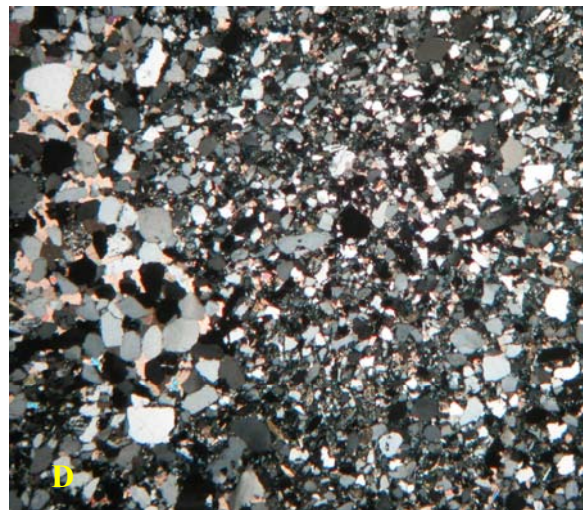
ESTAMPA IV



Estampa V

- (a) *Fotomicrografia da litofácies Al.* Observar a concentração de cimentação carbonática e a boa porosidade da amostra (Nícois paralelos; 2,5x).
- (b) *Fotomicrografia da litofácies Acc.* Observar a grande quantidade de material argiloso, que como discutido no Apêndice B, pode ser resultado do esmagamento de grãos de argila (Nícois paralelos; 2,5x).
- (c) *Fotomicrografia da litofácies Ad.* Aspecto geral da lâmina (Nícois paralelos; 2,5x).
- (d) *Fotomicrografia da litofácies Ae.* Observar a cimentação carbonática desenvolvida em regiões de maior concentração de grãos mais grossos (Nícois cruzados; 2,5x).
- (e) *Fotomicrografia da litofácies Aep.* Observar a cimentação carbonática e a porosidade obstruída por argila (provavelmente por desagregação de feldspato). (Nícois paralelos; 2,5x).
- (f) *Fotomicrografia da litofáciess Ab.* Aspecto geral da amostra analisada. Observar a quantidade de óxido de Ferro (Nícois paralelos; 2,5x).

ESTAMPA I



Apêndice D – Caracterização das eletrofácies

1 Eletrofácies Evd (verde claro) e Ecz (cinza)

Diagnose. – Ambas as eletrofácies apresentam valores médios normalizados relativamente altos nas curvas de raio-gama ($Evd = 0,64$ e $Ecz = -0,81$), diferenciando-se pelo alto valor médio normalizado na curva de densidade, maior na Ecz (4,55), e menor na Evd (0,07).

Interpretação. – Rochas microclásticas radioativas.

Discussão. – A Evd é freqüente e ocorre em pacotes que atingem mais de 100 metros de espessura, nos quais, por vezes, aparece-lhe relacionado em sucessão, com baixa freqüência a Ecz.

Estas eletrofácies são facilmente reconhecidas na curva de potencial espontâneo (SP) por serem associadas à linha base do folhelho (*shale line*), e, no perfil de raio-gama (GR), por corresponderem a altos valores da curva, o que lhes permite a interpretação de rocha microclástica como lamitos (folhelho, siltito e argilito).

A diferença entre as eletrofácies só é notada quando se observa o perfil de densidade (RHOB) e reconhecem-se picos de altos valores na Ecz. Estes valores altos de densidade são entendidos por cimentação carbonática, ou até mesma a presença de nódulos ou concreções carbonáticas, muito comumente observadas em campo na litofácies Lp. Estas eletrofácies compõem tipicamente a eletrossequência 1.

2 Eletrofácies Evm (vermelha)

Diagnose. – Densidade mais baixa dentre todas as eletrofácies apresentando menor valor médio normalizado na curva de densidade (0,27).

Interpretação. – Indício de gás ou matéria orgânica vegetal em rochas macro- ou microclásticas.

Discussão. – Esta eletrofácies é caracterizada por picos isolados de baixos valores na curva de RHOB e possui baixa frequência entre as demais eletrofácies. Assim, pode associar-se a uma tanto a eletrofácies interpretada como rochas macroclástica (p.ex., Elj) quanto microclásticos (Evd).

Ocorre mais expressivamente na eletrossequência 3, que equivale a unidade deposicional C de Caixeta (1988), que considera as rochas desta unidade como potenciais reservatórios. Embora haja presença de detritos vegetais, que são freqüentemente encontrados nos arenitos da Formação Maracangalha, muito provavelmente são indícios de gás, constatado e produzido no campo de Jacuípe.

3 Eletrofácies Elj (laranja)

Diagnose. – Caracterizada por valores médios normalizados intermediários nos três perfis (GR= -1,49 RG; SP= -0,16 e RHOB= -0,96).

Interpretação. – Arenitos lamosos.

Discussão. – Esta eletrofácies pode aparecer com grande espessuras e frequência. Nos perfis de GR são reconhecidos, em geral, através de valores baixos a intermediário, em padrão em “caixote”, o que permite supor argilosidade em arenitos quando comparado a outras eletrofácies (Eam, Er e Em).

Esta eletrofácies ocorre nas eletrossequências 3, 4, 5 e 6, (equivalentes às unidades A,

C, D e E de Caixeta, (1988), o que aponta depósitos gravitacionais (colapsamento de frente deltaica).

4 Eletrofácies Eam (amarela), Er (rosa) e Em (marrom)

Diagnose – Estas eletrofácies são caracterizadas, em geral, por baixos valores médios normalizados de raio-gama ($E_{am} = -0,037$; $E_r = -0,36$ e $E_m = -0,99$) e por baixos à intermediários valores de densidade ($E_{am} = -3,16$; $E_r = -0,92$ e $E_m = 0,47$)

Interpretação – Arenito “limpo”

Discussão – Estas eletrofácies nas curvas estão associadas em padrão serrilhado dos perfis de GR e SP que contém a Evd. Aparece mais expressivamente na eletrossequência 2 e raramente em outras eletrossequências. Vale ressaltar que não foi observada nenhuma divisão das eletrofácies de acordo com as estruturas sedimentares dos arenitos. Esta ocorreu apenas de acordo com suas propriedades medidas nos perfis. O baixo valor de RG e SP permitiu-lhe ser interpretado como arenitos pobres em matriz argilosa (“limpos”).

ANEXOS

A Um fluxo de trabalho para modelagem de eletrofácies com entrelaçamento de técnicas de classificação supervisionada e não-supervisionada (Soares, 2005)

B Fácies sedimentares gravitacionais e deformacionais da Formação Maracangalha em afloramentos e sua importância na exploração da bacia do Recôncavo (Guerra & Borghi, 2003)

Um fluxo de trabalho para modelagem de eletrofácies com entrelaçamento de técnicas de classificação supervisionada e não-supervisionada.

José Agnelo Soares (agnelo@geologia.ufrj.br) - Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

This paper presents a workflow to build logfacies models which is based on the interlaced application of non-supervised and supervised statistical techniques. The workflow allows answering, in an interactive manner, some basic issues which appear in any logfacies modeling program: How many facies may be recognized? Which is the best log suite to be used in? How the generated logfacies correlate with the original lithofacies? Due to the interactive process between supervised and non-supervised techniques, the proposed workflow is biased to produce a fewer number of logfacies than the number of original lithofacies, but those logfacies tend to correspond to, in a physical properties sense, those most representative lithofacies. A main feature of this workflow is the adoption of the logfacies column provided by a non-supervised classification algorithm as the input column of facies for a supervised classification procedure. This feature warrants that the recognized logfacies suite is the best possible, in terms of log physical properties and lithofacies reproduction. Finally, it is shown a real case where this workflow was applied successfully.

Introdução

A modelagem de eletrofácies pode ser definida como a tentativa de reconhecimento da coluna faciológica de um poço a partir dos perfis geofísicos desse poço. Trata-se de uma importante atividade que permite a construção do modelo geológico da área, mesmo na ausência de testemunhos contínuos na maioria dos poços. Basicamente três famílias de técnicas têm sido utilizadas com o objetivo de reconhecer eletrofácies: as técnicas estatísticas, as redes neurais, a regra *fuzzy*, ou ainda combinações destas.

Este trabalho trata apenas da aplicação de um conjunto de técnicas estatísticas, regularmente usadas para a classificação supervisionada (Tatsuoka, 1971) ou não-supervisionada (Massart & Kaufman, 1983), com o objetivo de reconhecimento das fácies geológicas atravessadas por poços a partir dos perfis geofísicos. Na modelagem de eletrofácies, classificação supervisionada é aquela feita com base na geração de uma regra de reconhecimento de fácies obtida em um intervalo de poço para o qual já se conhece a descrição faciológica de testemunho (lithofácies). Por outro lado, a classificação

não-supervisionada é aquela realizada puramente com base na separação dos grupos de amostras com padrões semelhantes em termos das variáveis classificatórias (no caso, os perfis geofísicos dos poços).

Entre os métodos de classificação não-supervisionada estão *Average Linkage*, Centróide e *K-means*. Os dois primeiros são baseados na distância entre amostras no espaço n -dimensional, onde n é o número de perfis utilizado. O *Average Linkage* constrói os grupos de acordo com as menores distâncias entre todos os pares possíveis de amostras da população. Esta característica o torna sensível a possíveis valores anômalos. O método Centróide, por sua vez, define os grupos com base na distância (no espaço n -dimensional) entre os centros, ou valores médios, de cada nuvem de amostras, o que o torna um método mais robusto à presença de valores anômalos. Já o método *K-means*, que somente pode ser usado quando já se conhece o número K de grupos (ou eletrofácies) que se deseja modelar, age da seguinte maneira: inicialmente, gera K grupos formados aleatoriamente pelas amostras dos perfis, a seguir esse método reorganiza a composição de cada grupo de modo a minimizar a variabilidade interna de cada grupo e maximizar a variabilidade entre grupos.

Pode-se associar, a alguns métodos de classificação não-supervisionada, algumas estatísticas que permitem, com base nos dados disponíveis, estimar o número ideal de fácies a reconhecer. Estas estatísticas são as funções *Pseudo-F*, *Pseudo- t^2* e *Cubic Clustering Criterion (CCC)*. Além disso, pode-se avaliar a composição de cada grupo através de um diagrama em árvore.

Os métodos de classificação supervisionada incluem os chamados métodos paramétricos, que são aqueles para os quais se assume que as distribuições das variáveis obedecem a uma função distribuição conhecida (como funções multinormais, por exemplo), e os métodos não-paramétricos, para os quais essa restrição não se aplica. Os métodos paramétricos incluem a Regra Discriminante Linear (RDL) e a Regra Discriminante Quadrática (RDQ). Já os métodos não-paramétricos incluem, entre outros, os métodos da regra discriminante passo-a-passo, *K-nearest neighbor* (KNN), e regra discriminante canônica. A regra discriminante linear passo-a-passo permite ordenar os vários perfis disponíveis segundo uma ordem decrescente de poder discriminante. Essa característica torna esse método uma ferramenta muito adequada para utilização na fase inicial do trabalho de modelagem de eletrofácies, quando da escolha dos perfis a serem usados no trabalho. O método KNN se baseia na adoção do rótulo que aparece mais vezes entre os K vizinhos mais próximos, no espaço n -dimensional, segundo a métrica adotada. Já o método da regra canônica consiste num método de redução de dimensão, onde se procura obter algumas variáveis canônicas, pela combinação

linear das variáveis originais, mas não correlacionadas entre si, que juntas, maximizem o poder de discriminação entre fácies.

O fluxo de trabalho

Um fluxograma da estratégia proposta para a modelagem de eletrofácies é apresentado na Figura 1. A primeira operação é constituída pela edição dos dados, que corresponde à preparação do arquivo em colunas, retirada das amostras com dados faltantes, e incorporação da coluna de litofácies, quando disponível.

A seguir os dados passam pela etapa de transformação e padronização das variáveis. Alguns perfis, como é caso dos perfis de resistividade elétrica, variam os valores registrados muito rapidamente, o que normalmente exige uma escala logarítmica para a sua apresentação. Nesses casos recomenda-se aplicar alguma função de transformação para essas variáveis, de modo que as variáveis transformadas tenham um comportamento aproximadamente linear. Para os perfis de resistividade, pode-se aplicar a seguinte transformação:

$$\Omega' = \log_{10}(\Omega + 1) \quad (1)$$

onde Ω é valor original do perfil de resistividade e Ω' é o valor transformado de resistividade.

A padronização é recomendada para todas as variáveis, uma vez que ela deixa todos os perfis com média nula e desvio padrão unitário, fazendo com que todas as variáveis estejam numa mesma escala de valores. O processo de padronização ajuda, inclusive, na interpretação dos coeficientes da regra discriminante, identificando rápida e claramente o poder discriminante relativo de cada perfil. A padronização é dada por

$$x_i' = \frac{x_i - \bar{X}}{\sigma} \quad (2)$$

onde x_i é valor da i-ésima amostra do perfil, \bar{X} é o valor médio do perfil, e σ é o desvio padrão do perfil.

Conforme a Figura 1, os dados devem ser separados em três conjuntos: um conjunto para treinamento da regra, outro para validação, e um terceiro para predição, ou seja, para o reconhecimento propriamente dito das fácies. A proporção de dados em cada um desses conjuntos pode ser bastante variável, pois depende em muito do quão complexa é a geologia local, da suíte disponível de perfis geofísicos, e da quantidade e representatividade das fácies a reconhecer. De modo geral, costuma-se usar cerca de 30% dos dados para treinamento, 10% a 20% para validação e o restante para a fase de predição. É importante ressaltar que, para a estratégia de classificação aqui apresentada, os dados de treinamento e de validação incluem a descrição de litofácies. Esta exigência não se aplica aos dados de predição.

Com o conjunto de dados de treinamento, procede-se à fase de geração da regra discriminante. É nesta fase que se recomenda que sejam usadas, de forma entrelaçada, as técnicas de classificação supervisionada e não-

supervisionada. Essa estratégia permite responder a algumas questões fundamentais como:

1. Para reconhecer as fácies que desejo, dentre os perfis que disponho, quais deles devo usar? Nem sempre usar todos os perfis resulta no melhor reconhecimento de fácies, pois às vezes adicionar mais uma curva não significa agregar informação útil, mas apenas aumentar o ruído do sistema.
2. Qual o número de fácies que meus perfis podem reconhecer? Em geral, os perfis reconhecem um número de fácies muito menor que aquele reconhecido pelo geólogo responsável pela descrição dos testemunhos.
3. E finalmente, qual a relação entre as eletrofácies reconhecidas e as litofácies descritas pelo geólogo?

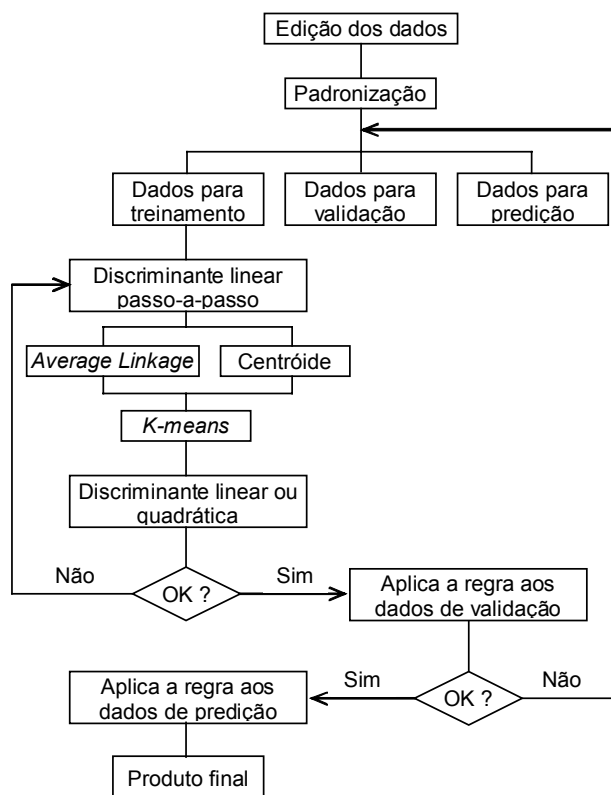


Figura 1 – Fluxograma para modelagem de eletrofácies através do uso entrelaçado de técnicas de classificação supervisionada e não-supervisionada.

Com o objetivo de determinar a melhor suíte de perfis, dentre aqueles disponíveis, aplica-se, inicialmente, a regra discriminante linear passo-a-passo nos dados de treinamento. Essa técnica de classificação supervisionada enumera, em ordem decrescente de prioridade, os perfis com maior poder discriminante e, adicionalmente, exclui do modelo aqueles perfis que contribuiriam de forma negativa para o reconhecimento das fácies pretendidas. Nesta etapa as fácies a reconhecer ainda são as litofácies originais, descritas diretamente da observação dos testemunhos.

A seguir, com o objetivo de definir o número ideal de fácies a reconhecer, procede-se à aplicação, em paralelo, dos procedimentos de classificação não-supervisionada *Average Linkage* e Centróide sobre o conjunto de dados de treinamento, desta vez desprezando o conhecimento prévio das litofácies. Com o suporte dos gráficos das estatísticas *Pseudo-F*, *Pseudo-t²* e CCC, define-se o número ideal de fácies a reconhecer. As figuras 2, 3 e 4 apresentam exemplos de saídas gráficas para essas estatísticas.

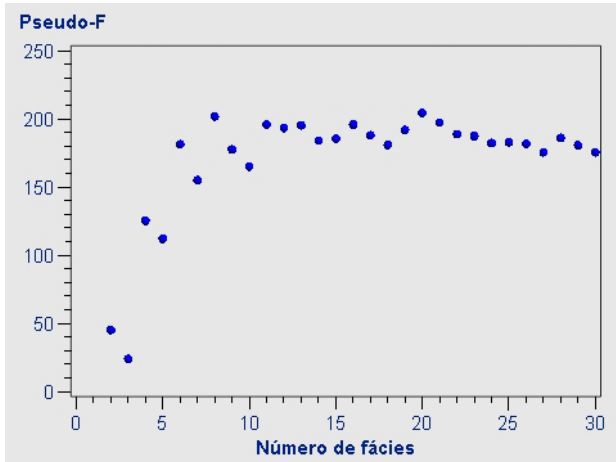


Figura 2 – Estatística *Pseudo-F* contra o número de fácies, segundo a técnica de classificação não-supervisionada *Average Linkage*.

O gráfico da estatística *Pseudo-F* indica bons números de grupos quando essa estatística apresenta valores elevados. Assim, para o caso da Figura 2, vemos que 4 ou 6 fácies seriam, de acordo com a estatística *Pseudo-F*, bons números de fácies para se tentar identificar. Quantidades muito altas (como 10, por exemplo) ou muito baixas de fácies (como 2, por exemplo) não são desejáveis para a modelagem de eletrofácies.

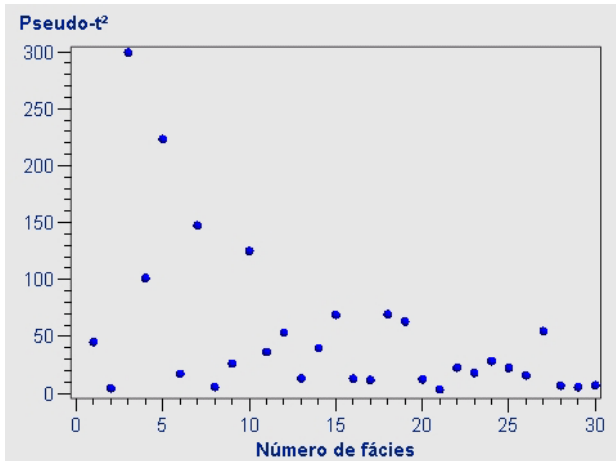


Figura 3 – Estatística *Pseudo-t²* contra o número de fácies, segundo a técnica de classificação não-supervisionada *Average Linkage*.

O gráfico da estatística *Pseudo-t²* apresenta valores altos para os números de fácies imediatamente anteriores aos ideais. Para o caso da Figura 3, cujos dados processados

são os mesmos utilizados na Figura 2, os bons números de fácies seriam, novamente, 4 ou 6.

No caso da estatística CCC, valores positivos maiores que 2 ou 3 são indicativos de bons números de fácies, valores entre 0 e 2 indicam valores potenciais de número de fácies, enquanto que valores negativos elevados são indicativos da presença de valores anômalos. No caso dos dados da Figura 4, que são os mesmos das figuras 2 e 3, um bom número de fácies seria 6.

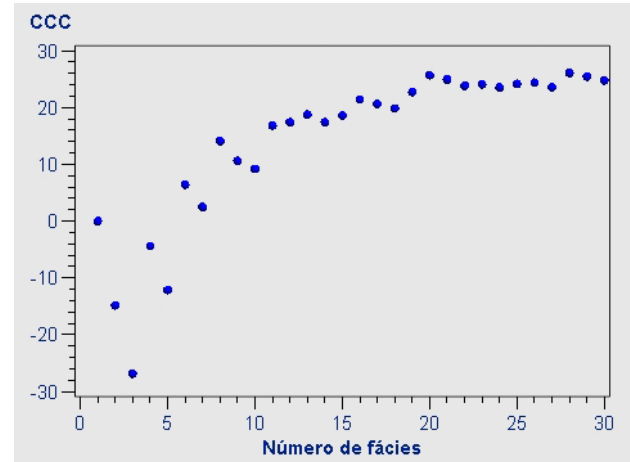


Figura 4 – Estatística CCC contra o número de fácies, segundo a técnica de classificação não-supervisionada *Average Linkage*.

Considerando a intersecção entre os valores indicados pelas três estatísticas, pode-se então considerar que 4 ou 6 seriam os números mais indicados de fácies a reconhecer, nesse caso. O intérprete deve então decidir qual número de fácies considerar, dentre aqueles indicados nesta última etapa. Considerar quatro fácies provavelmente significa reconhecer uma fácies não-reservatório e mais três fácies portadoras de distintos níveis de potencialidade para reservatório. Por outro lado, considerar 6 fácies talvez seja excessivamente detalhado para a modelagem de fluxo. Adotar qualquer outro número de fácies, no entanto, provavelmente resultaria numa precisão menor de predição.

Uma vez definido o número de fácies a reconhecer, deve-se proceder a uma classificação não-supervisionada segundo o método *K-means*. Vale a pena lembrar que as fácies agora reconhecidas não são mais as fácies originais, resultantes da descrição dos testemunhos, mas são fácies compostas, as quais rigorosamente somente podem ser definidas em termos das suas propriedades físicas. Felizmente, o procedimento aqui adotado garante algum nível de correlação entre as principais litofácies e algumas das fácies compostas previstas. Quanto às litofácies de menor representatividade, essas tendem a sofrer um processo de pulverização entre as diversas fácies compostas.

A comparação entre a coluna de fácies compostas e a coluna original de litofácies, mostra que a primeira corresponde à segunda com algum grau de suavização. A perda de detalhes não representa, necessariamente, um fator negativo, desde que as feições significativas

sejam preservadas. Qualquer resultado experimental, inclusive a descrição de testemunhos, está sujeita à presença de ruídos indesejáveis. Ao captar prioritariamente as fácies mais marcantes, esse método de geração de fácies compostas exclui, em algum grau, esses ruídos. Além disto, este fenômeno representa uma mudança de escala (*upscaling*) desejável para as modelagens geológica e de fluxo, etapas posteriores à modelagem de eletrofácies.

Assim, uma característica fundamental deste fluxo de trabalho é a adoção da coluna de fácies compostas como sendo representativa da coluna original de litofácies. É essa coluna de fácies compostas que será utilizada, na etapa seguinte, para gerar a regra discriminante a qual será finalmente utilizada para a modelagem definitiva das eletrofácies.

A próxima etapa consiste na geração da regra discriminante que será doravante utilizada em todas as demais etapas do trabalho de modelagem de eletrofácies. Para isto, a coluna de fácies resultante da classificação não-supervisionada pela técnica *K-means* é dada como dado de entrada para a classificação supervisionada pela RDL ou RDQ. Os resultados desta etapa são a regra discriminante propriamente dita e uma nova classificação de eletrofácies, agora baseada na regra gerada. Neste ponto deve-se avaliar a eficiência do processo examinando se a coluna de fácies gerada pela regra respeita as principais feições da coluna litológica original. Em caso negativo, deve-se refazer o processo a partir da aplicação da regra discriminante passo-a-passo, escolhendo melhor os perfis a utilizar, revendo o número ideal de fácies a modelar e reavaliando o uso da RDL ou da RDQ. Em caso positivo, o processo evolui para a aplicação da regra gerada nos dados de validação.

Após submeter os dados de validação à classificação segundo a regra discriminante gerada, deve-se avaliar novamente o processo. Uma vez que a regra discriminante utilizada foi gerada usando apenas os dados de treinamento, aplicá-la aos dados de validação pode resultar numa classificação errônea, mas isto somente acontecerá se houver uma grande variação das características litológicas ou das propriedades físicas dos tipos litológicos entre os dois conjuntos de dados. Obviamente, nesse caso não se pode extrapolar a regra obtida com os dados de treinamento para outros conjuntos dados e a solução seria redistribuir os dados entre os três conjuntos de dados (treinamento, validação e predição) de forma mais representativa. Para evitar esse tipo de problema, recomenda-se que, antes de começar o trabalho de modelagem de eletrofácies, seja feito uma pesquisa exploratória nos dados, observando quais litofácies estão presentes em quais poços, quais perfis estão disponíveis em quais poços, quais poços possuem descrição de litofácies e como se distribuem as variáveis nos diversos poços. Como resultado dessa pesquisa exploratória de dados, o conjunto de dados de treinamento poderá ser escolhido de forma mais representativa, fazendo com que a aplicação da regra aos dados de validação atinja resultados satisfatórios.

A escolha dos dados de validação deve procurar obedecer a um critério de representatividade espacial, ou

seja, os poços de validação devem ser escolhidos de tal forma que os poços de predição estejam inscritos dentro de um polígono definido pelos poços de validação.

Uma vez aceita a classificação dos dados de validação, segundo a regra discriminante gerada com os dados de treinamento, pode-se então proceder à classificação definitiva dos dados do conjunto de predição. Após essa última etapa, todas as classificações, segundo a regra discriminante (RDL ou RDQ) utilizada, compõem o produto final que é a modelagem de eletrofácies para o campo.

Estudo de caso

A fim de exemplificar a modelagem de eletrofácies, conforme o fluxo de trabalho proposto neste trabalho, serão apresentados, a seguir, os resultados obtidos sobre os dados referentes a quatro poços de um determinado campo produtor de petróleo. Para cada um dos quatro poços, foram disponibilizados os perfis geofísicos de raios gama (GR), resistividade profunda por indução (ILD), porosidade de nêutrons (NPHI), densidade (RHOB), além da descrição faciológica dos testemunhos (coluna de litofácies).

Com o objetivo de reproduzir todas as etapas do fluxo de trabalho apresentado na Figura 1, os dados foram divididos da seguinte maneira: os dados do poço 1 foram utilizados como conjunto de treinamento, os dados do poço 2 foram considerados como de validação, e os dados dos poços 3 e 4 foram usados para predição. Dessa forma, apenas para o poço 1 a coluna de litofácies foi utilizada como dado de entrada para o processo de modelagem de eletrofácies. Para os demais poços a coluna de litofácies foi usada apenas como um controle de qualidade para a coluna de eletrofácies gerada.

A Figura 5 apresenta os resultados obtidos para o poço 1, o qual forneceu os dados de treinamento ou, em outras palavras, de geração da regra discriminante. Esta figura contém cinco colunas que, da esquerda para a direita, representam as seguintes variáveis: coluna de litofácies, coluna de indicação da presença de hidrocarbonetos, coluna de indicação de cimentação, coluna de eletrofácies resultante da classificação não-supervisionada pelo algoritmo *K-means*, e coluna de probabilidade de eletrofácies resultante da classificação supervisionada pela regra discriminante gerada com os dados do poço 1.

As eletrofácies das Figuras 5 a 8, identificadas por cores, são definidas em termos das suas propriedades físicas padronizadas médias, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Média e desvio-padrão das propriedades padronizadas de perfil das eletrofácies dos quatro poços.

Fácies	GR _p	ILD _p	NPHI _p	RHOB _p
Amarela	-1,2 ± 0,2	1,9 ± 0,9	-1,7 ± 0,4	1,1 ± 0,7
Laranja	-0,6 ± 0,5	0,2 ± 0,7	-0,5 ± 0,5	0,3 ± 0,8
Vermelha	1,0 ± 0,8	-1,0 ± 0,2	1,6 ± 0,8	-3,4 ± 1,1
Verde	0,9 ± 0,7	-0,6 ± 0,5	0,8 ± 0,4	-0,4 ± 0,7

Das propriedades médias padronizadas descritas na Tabela 1, vê-se que as fácies amarela e laranja são as melhores fácies-reservatório, a fácies verde corresponde a rochas pelíticas (não-reservatório) e a fácies vermelha é, em geral, uma fácies argilosa de qualidade inferior como rocha-reservatório.

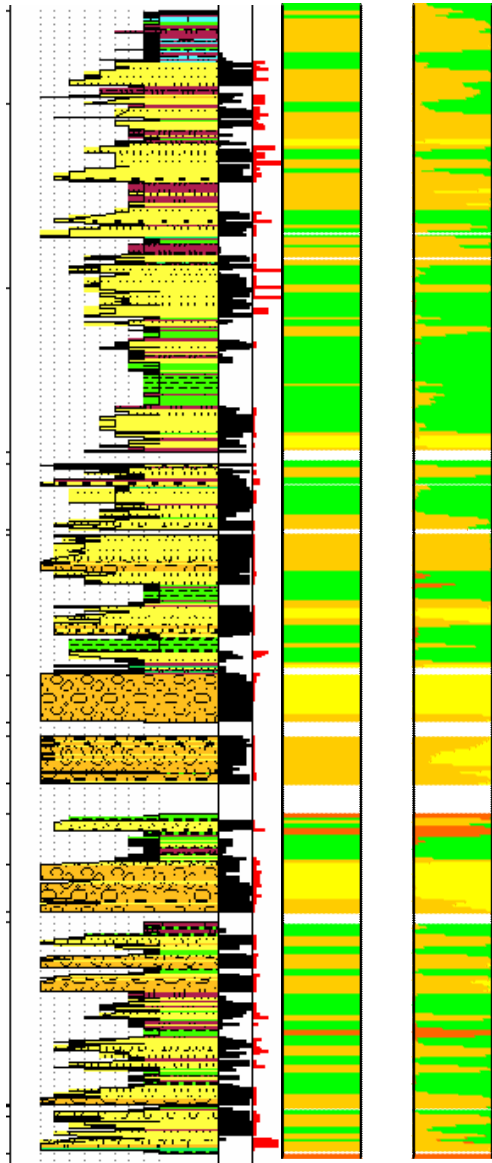


Figura 5 – Colunas de litofácies, hidrocarbonetos, cimentação, eletrofácies por classificação não-supervisionada e eletrofácies por classificação supervisionada para o Poço 1 (dados de treinamento).

Discussão

A comparação entre a coluna de probabilidade de classificação de fácies, de cada um dos poços, com a correspondente coluna de litofácies, mostra que as eletrofácies reconhecidas nos Poços 1, 2, 3 e 4, apesar de geradas através de uma regra discriminante definida apenas com dados do Poço 1, reproduzem, na grande maioria das vezes, as litofácies de cada um desses

poços. Além disso, foram reconhecidas quatro eletrofácies, sendo três de rochas-reservatório e uma de rochas não-reservatório, todas definidas em termos das propriedades físicas médias registradas pelos perfis geofísicos dos poços.

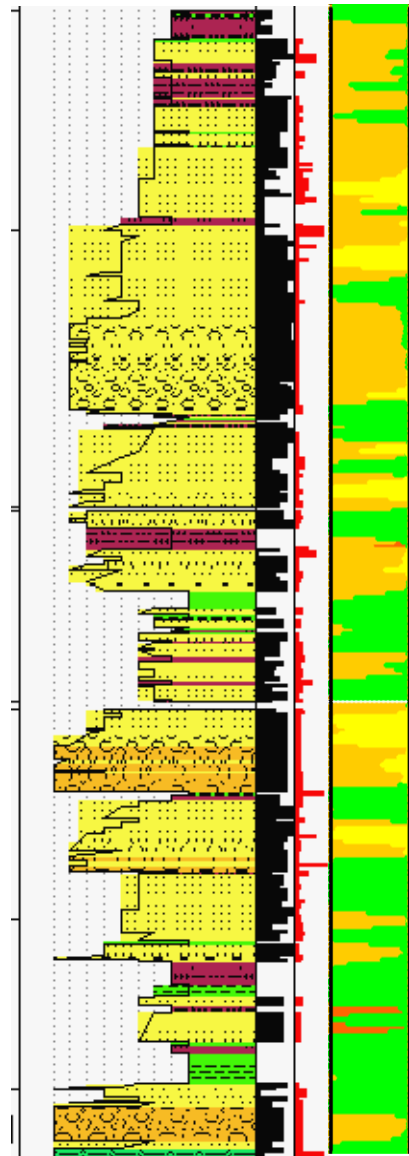


Figura 6 - Colunas de litofácies, hidrocarbonetos, cimentação, e eletrofácies para o Poço 2. A coluna de eletrofácies foi obtida aplicando-se a regra discriminante gerada apenas com os dados do Poço 1.

Deve-se abrir uma discussão a respeito da conveniência de se fazer a padronização dos perfis de modo separado para cada poço, como foi feito neste exemplo, ou se a padronização deve ser feita de uma só vez para todos os poços. Quando uma mesma fácies, em poços diferentes, possui propriedades distintas, é preferível fazer a padronização de forma separada para cada poço. Já quando há falta de alguma fácies, em algum dos poços, deve-se padronizar todos os poços de uma só vez.

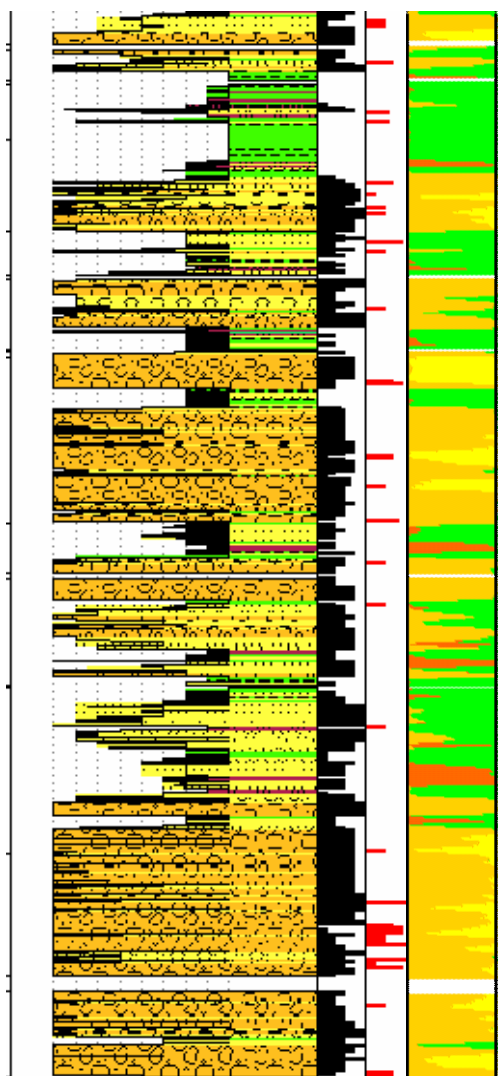


Figura 7 - Colunas de litofácies, hidrocarbonetos, cimentação, e eletrofácies para o Poço 3. A coluna de eletrofácies foi obtida aplicando-se a regra discriminante gerada apenas com os dados do Poço 1.

Conclusões

A modelagem de eletrofácies com entrelaçamento de técnicas de classificação supervisionada e não-supervisionada permite reconhecer de forma adequada as principais fácies, segundo as suas propriedades físicas. A estratégia adotada reduz, em geral, o número de fácies em comparação com o número de fácies originais. Isto funciona como uma espécie de filtro, preservando apenas as fácies mais representativas, o que, do ponto de vista da construção dos modelos geológico e de fluxo de fluidos, é uma característica desejável, pois trabalha favoravelmente ao *upscaling* exigido naquelas etapas posteriores da engenharia de reservatórios. O fluxo de trabalho proposto permite também definir o número ideal de fácies a reconhecer, qual a melhor suíte de perfis a utilizar, dentre todos os perfis disponíveis, e qual a relação entre as eletrofácies encontradas e as litofácies originais.

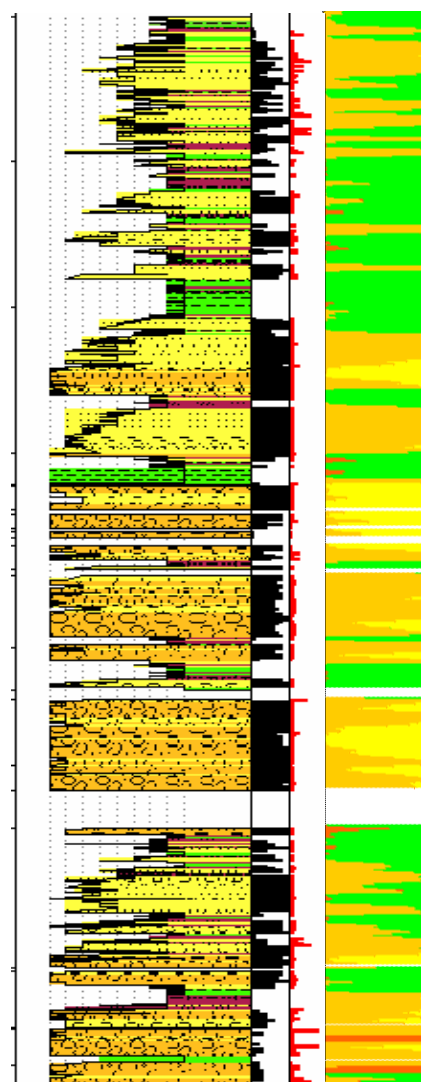


Figura 8 - Colunas de litofácies, hidrocarbonetos, cimentação, e eletrofácies para o Poço 4. A coluna de eletrofácies foi obtida aplicando-se a regra discriminante gerada apenas com os dados do Poço 1.

Agradecimentos

O autor agradece a PETROBRAS e FINEP pelo financiamento do Projeto CTPETRO Perfil, que possibilitou a execução deste trabalho. Agradece ainda às inúmeras colaborações dos professores Cláudio Bettini e João Ismael, da UFRJ, e da geóloga Maria do Socorro de Souza, do Centro de Pesquisas da Petrobras.

Referências

- Massart, D.L. and Kaufman, L. (1983)** *The Interpretation of Analytical Chemical Data by the Use of Cluster Analysis*, New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Tatsuoka, M.M. (1971)** *Multivariate Analysis*, New York: John Wiley & Sons, Inc.

FÁCIES SEDIMENTARES GRAVITACIONAIS E DEFORMACIONAIS DA FORMAÇÃO MARACANGALHA EM AFLORAMENTO E SUA IMPORTÂNCIA NA EXPLORAÇÃO DA BACIA DO RECÔNCAVO

Gabriel Soares GUERRA¹ & Leonardo BORGHI²

¹ Shell Brasil Ltda.

Praia de Botafogo, 440/19.º andar, 22250-040 Rio de Janeiro, RJ (gabriel.guerra@shell.com.br)

² Departamento de Geologia, IGeo, CCMN, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

21949-900 Rio de Janeiro, RJ (lborghi@ufRJ.br)

Resumo – A Formação Maracangalha (bacia do Recôncavo, Eocretáceo) apresenta uma série de fácies gravitacionais e deformacionais (camadas Caruaçu e Membro Pitanga), que se constituem em reservatórios de gás no sistema petrolífero Candeias–Maracangalha(!). Descrevem-se 10 fácies sedimentares dessa natureza na formação – dentre elas, 3 definidas por Mutti (*Turbidite sandstones*, 1992) e 2 por Mutti *et alii* (*Estr. Mem. Sci. Geol.*, **28**, 1996) – organizadas em associações de fácies de “rampa” e “plataforma–talude”. A associação de fácies de rampa subdivide-se em tratos de fácies de “turbiditos” e “inunditos”, enquanto que a associação de plataforma–talude subdivide-se nos tratos “arenáceo” e “heterolítico”. O paleoambiente deposicional proposto envolve deltas lacustres dominados por inundações fluviais que evoluem de uma morfologia em rampa para plataforma e talude. Sugerem-se feições de perfis elétricos e de sismofácies para as associações de fácies.

Palavras-chave: bacia do Recôncavo; Formação Maracangalha; Membro Caruaçu; Membro Pitanga; Cretáceo

Abstract – The Maracangalha Formation (Recôncavo Basin, Early Cretaceous) shows gravitational and deformational facies (Caruaçu beds and Pitanga Member), which constitute gas reservoirs in the Candeias–Maracangalha(!) petroleum system. Ten sedimentary facies of this nature were described in this formation – 3 previously defined by Mutti (*Turbidite sandstones*, 1992), and 2 by Mutti *et alii* (*Estr. Mem. Sci. Geol.*, **28**, 1996) – which were organized in “ramp” and “shelf–slope” facies associations. The ramp facies association divides itself in “turbidite” and “inundite” facies tracts, and the shelf–slope facies association is divided into “sandy” and “heterolithic”. The proposed depositional paleoenvironment involves lacustrine deltas dominated by river flooding, which evolves from a ramp morphology to a shelf and slope one. Electrical logs and seismofacies patterns are suggested for the facies associations.

Keywords: Recôncavo Basin; Maracangalha Formation; Caruaçu Member; Pitanga Member; Cretaceous

1. Introdução

A bacia do Recôncavo, localizada no Estado da Bahia, é classificada como um aulacógeno cuja origem é associada à abertura do oceano Atlântico Sul durante o Cretáceo. Nela, a Formação Maracangalha (Eocretáceo) é contida os arenitos Pitanga e os folhelhos Maracangalha, antigos integrantes da Formação Candeias do Grupo Santo Amaro, e as camadas Caruaçu, arenitos anteriormente pertencentes à Formação Marfim do Grupo Ilhas (Caixeta *et alii*, 1994). A formação faz parte do grupo dos reservatórios da fase rifte e tem como principal modelo de migração e acumulação armadilhas de inversão estrutural geradas por falhas de crescimento e estruturas de *rollover*. Segundo Figueiredo *et alii* (1994), a Formação Maracangalha contém a principal acumulação de gás não-associado da bacia, apresentando 5,2 bilhões m³ (183,6 bcf) o que representa 35% do volume total de gás da bacia, participando do sistema petrolífero Candeias–Maracangalha(!).

Sob a ótica de estudos faciográficos, Mello *et alii* (1971) realizaram um estudo integrado dos, então, Membro Pitanga e camadas Caruaçu, dividindo o primeiro em 3 fácies e o segundo em 12 fácies sedimentares. Destas fácies, foram estabelecidas 3 associações de fácies, denominadas de (i) “associação de planície deltáica”, (ii) “associação de escorregamento da parte superior das calhas da frente deltáica” e (iii) “associação de sedimentos resultantes de fluxo granular e de lama, da parte inferior das calhas da frente deltáica”. Definiu-se então o paleoambiente como deltáico.

As camadas Caruaçu e o Membro Pitanga e foram estudados por Caixeta (1988) dentro do âmbito do campo de Jacuípe. Tais unidades foram divididos em 6 fácies sedimentares, que foram agrupadas em 5 “Unidades Faciológicas” (associações de fácies). Estas associações de fácies representam, em termos paleoambientais, os sub-ambientes de (i) frente deltaica *in situ*, (ii) frentes deltaicas remobilizadas por deslizamentos e escorregamentos, (iii) turbiditos canalizados, (iii) turbiditos em lobos e (iv) depósitos de fluxos-de-detritos.

Rodrigues (1988, *apud* Raja Gabaglia, 1990) estudou os sedimentos das camadas Caruaçu e do Membro Pitanga no âmbito do campo de Miranga Profundo e, inspirado nos modelos de turbiditos de R.G. Walker, interpretou-os como originados por complexos de canal–dique marginal em posição proximal e mediana, respectivamente, cortados por vários canais migrantes em um leque sublacustrino. Todo o conjunto caracterizaria um sistema de leque prográdante, onde as fácies proximais (camadas Caruaçu) superpor-se-iam às fácies medianas (Membro Pitanga).

Raja Gabaglia (1990) aborda os sedimentos das camadas Caruaçu e do Membro Pitanga e sob o enfoque de sismos como mecanismos deformadores e disparadores dos fluxos gravitacionais. Para tanto, a formação foi dividida em 3 grupos de fácies: (i) fácies deposicionais de origem indefinida, onde o caráter deformativo ou de ausência de estruturas acentuam a dificuldade de estabelecimento de sua origem, se deposicional ou sismogênica; (ii) fácies deposicionais sismogênicas, para as quais se pode aventar, com certa segurança a possibilidade de origem sismogênica direta ou indireta; e (iii) fácies deposicionais *stricto sensu*, onde os caracteres deposicionais estão integralmente preservados.

2. Objetivo, finalidade e material de estudo

O objetivo deste trabalho é o de caracterizar e reanalisar as fácies gravitacionais e deformacionais da Formação Maracangalha (camadas Caruaçu e Membro Pitanga), que permitam contribuir para a discussão de modelos deposicionais que auxiliem as atividades exploratórias de seus reservatórios de gás associados.

Foram descritos faciologicamente em atividade de campo 7 afloramentos em localidades nas ilhas de Itaparica (praia de Bom Despacho), dos Frades e de Marê, na baía de Todos os Santos; além da localidade de Ponta da Sapoca e proximidades do terminal de Madre de Deus, na Cidade de Salvador.

3. Fácies sedimentares

Foram identificadas 10 fácies sedimentares e 6 subfácies, cuja diagnose e interpretação são sumarizados na Tabela 1.

A fácies F5 (Estampa I, Figura 1) apresenta-se frequentemente em camadas de porte médio, lenticulares, com base irregular erosiva, incorporando intraclastos. No trato de fácies turbidíticas de Mutti (1992), ao qual pertence, ocupa uma posição mais proximal do que as fácies F8 e F9, as quais lhe derivam por transformações de fluxo, sucessivamente. A fácies F8 (Estampa I, Figura 2) apresenta-se em camadas tabulares de porte pequeno com base plana erosiva. Camadas da fácies F9 (Estampa I, Figura 2), semelhantes às da F8, tratam da clássica Sequência de Bouma de turbiditos, na qual há abundância de detritos vegetais (cutículas e pequenos lenhos carbonificados). O afloramento da praia de Bom Despacho apresenta a melhor exposição dessas fácies, onde ainda septárias podem ocorrer associados às fácies F5 e F8 como clastos.

A fácies 5 (Estampa I, figuras 2–4) ocorre em conjuntos de camadas tabulares de porte médio a grande com base plana a ondulada, levemente erosiva. Distintamente da fácies F9, com a qual se assemelha, não mostra clara gradação granulométrica nem seqüenciamento próprio de estruturas. Algumas das laminações cruzadas da fácies 5, cavalgantes, apresentam convexidades e ângulos baixos de repouso das lâminas frontais, o que sugere a ação de ondas. A fácies 6 (Estampa I, Figura 4), derivada dela em posição distal, trata de um expressivo intervalo T_c de Bouma,

assemelhando-se à fácies F9 *pro parte*. Ambas estas fácies resultam de inundações fluviais, via fluxo hiperpicnal, pertencendo ao modelo deposicional de inunditos de Mutti *et alii* (1996). Ocorrem tipicamente na praia de Bom Despacho e na Ponta da Sapoca.

Nos afloramentos das ilhas dos Frades e de Maré, podem se observar as melhores exposições das fácies Ad, O, Am e Ae. As fácies Ad e Am ocorrem em litossomas pouco definidos em afloramento e retratam um *continuum* de situações de deformações dúcteis (Estampa I, Figura 5) e rúpteis (Estampa I, Figura 6) de camadas originalmente organizadas de arenitos e heterolíticas (arenito/lutito) evoluindo para a completa homogenização do depósito em fluxos gravitacionais do tipo fluxo-de-detritos (Estampa I, Figura 7). Grandes volumes destas fácies, principalmente da Am, constituem olistostromas. A fácies O (Estampa I, Figura 8) representa litossomas volumosos de camadas organizadas preservadas pouco deformadas, imersas nas fácies Am ou Ad, os quais são olistólitos. A fácies Am ainda pode ocorrer em camadas tabulares a lenticulares, com base irregular erosiva, amalgamadas; neste contexto, a fácies Ae é sua variante, apresentando escape de fluidos. Todavia, os processos que resultam na fácies Ae (Estampa I, Figura 9) envolvem fluxos mais plásticos, ricos em água. Todas essas fácies contêm freqüentes a abundantes detritos vegetais, principalmente lenhos carbonificados.

Apenas a fácies Lp (Estampa I, Figura 10) não tem gênese relacionada a processos gravitacionais ou deformacionais, reelecionando-se à sedimentação de *background* lacustre. Esta foi observada muito pouco freqüente em relação às fácies congêneres de grã muito fina (fácies F9 e 6) nos afloramentos estudados, na maior parte das vezes presente como camadas de porte muito pequeno (mm). Apresenta distintamente cor escura. Os afloramentos da praia de Bom Despacho e da Ponta da Sapoca contêm exposições dessas fácies.

Tabela 1 – Fácies sedimentares identificadas nos afloramentos estudados.

Fácies	Diagnose	Interpretação
Mutti (1992)	F5 Arenito médio, maciço.	Decantação súbita (<i>en masse</i>) a partir de um fluxo turbidítico de densidade alta.
	F8 Arenito fino a muito fino, maciço.	Decantação a partir de um fluxo turbidítico de densidade alta.
	F9 Arenito fino a siltito, gradado, com laminações plano-paralelas e cruzadas de pequeno porte (Bouma: T _{b-c} , T _{c-e} , T _{d-e}).	Fluxo turbidítico de densidade baixa.
Mutti et alii (1996)	5 Arenito fino a muito fino (subordinadamente siltito), com laminação cruzada cavalgante [subfácies 5(T _c)] ou laminação plano-paralela [subfácies 5(T _d)].	Tração e decantação por um fluxo turbulento (hiperpícnal) de densidade baixa.
	6 Lutito maciço ou laminado de cor cinza ou acastanhada clara.	Decantação a partir de um fluxo turbulento (hiperpícnal) de baixa densidade, <i>quasi</i> -estático.
Ad	Arenito muito fino a fino, com estruturas deformacionais (d) tais como laminação convoluta [subfácies Ad(d)] ou falhas sinsedimentares [subfácies Ad(r)]. Pode conter até pequenos matacões de rocha sedimentar intraformacional.	Escorregamento (<i>slump</i>) ou solifluxão (<i>creep</i>), com caráter dúctil [(d)] ou rúptil [(r)].
O	Grandes matacões (decamétricos) de rocha sedimentar intraformacional.	Deslizamento (<i>slide</i>). Olistólito (O).
Am	Arenito muito fino [subfácies Am(a)], maciço, por vezes silto-argiloso [subfácies Am(h)]. Pode conter até pequenos matacões (métrico) de rocha sedimentar intraformacional.	Fluxo-de-detritos do tipo <i>sand debris</i> .
Ae	Arenito muito fino, siltico, maciço e com estruturas de escape (e) de fluido (estrutura-em-prato e estrutura-em-pilar).	Fluxo liquefeito / fluidizado
Lp	Argilito ou folhelho argiloso de cor escura. Pode apresentar-se deformado (laminação convoluta, dobras, planos de laminação encerrados <i>etc.</i>)	Decantação de sedimentos pelágicos (p)

4. Associações de fácies e modelo deposicional exploratório

4.1 Associação de fácies do tipo “rampa”

Esta associação de fácies é composta pelas fácies F5, F8 e F9 e fácies 5(T_c), organizada em 2 tratos (sucessões laterais) de fácies, conforme a Figura 11. Sua interpretação paleoambiental é a de frentes deltaicas prográdantes em um lago de rifte (paleolago Maracangalha) com uma geomorfologia de fundo em rampa; isto é, não existindo a diferenciação brusca entre uma “plataforma” e “talude” tectônicos.

O primeiro trato, denominado de trato de turbiditos, é composto pelas fácies F5, F8 e F9 e representa parte do modelo de fácies descrito por Mutti (1992) e Mutti *et alii* (1999). O segundo, denominado de trato de inunditos, contém apenas as fácies 5 e 6 de Mutti *et alii* (1996); porém interpreta-se para este trato uma derivação das fácies de 1 a 4, não observadas nos afloramentos estudados, mas possivelmente identificadas pela literatura (*e.g.*, fácies χ e ω de Melo *et*

alii, 1971). O aporte significativo de sedimentos via inundação fluvial, sobretudo de finos da fácies 6 parece ocorrer em contexto de água rasa, apesar desta constituir o caráter “distal” do modelo juntamente com a fácies 5. A instabilização superficial e momentânea da frente deltaica construída por inundações d  origem ao trato de turbiditos. Essa instabilização pode ocorrer por a  o puramente gravitacional, induzida pelo aumento brusco de sobrecarga de sedimentos aportados através das inundações. São turbiditos de “franja” ou frente deltaica.

Esta associação de fácies   típica das camadas Caruaçu e pode apresentar padrão do tipo funil (sino invertido) nas curvas de Raios-Gama (GR) e potencial espontâneo (SP), refletindo um padrão de granocrescência ascendente, t pico de seqüências deltaicas. Em termos sismoestratigráficos, esperar-se-iam sismofácies organizadas tais como paralelas ou oblíquas.

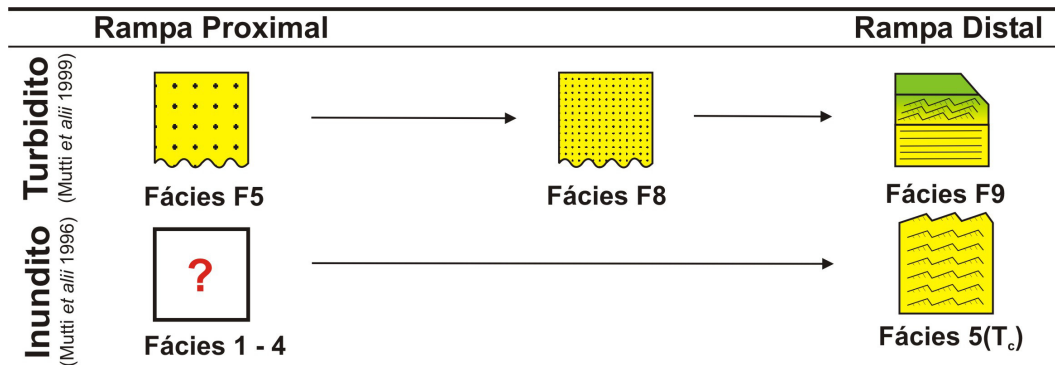


Figura 11 – Trato de fácies do tipo “rampa”, t pico das camadas Caruaçu.

3.2 Associação de fácies do tipo “plataforma–talude”

Esta associação é composta pelas fácies Am, O, Ad, Ae, F8, 5 e 6, organizada conforme dois tratos apresentados na Figura 12. Reflete um cenário tect nico mais avançado no desenvolvimento de deltas progradantes no paleolago Maracangalha, no momento em que a bacia apresenta uma geomorfologia de fundo mais complexa que a de uma rampa, compondo um sistema “plataforma–talude”. Essa mudança na configuração dar-se-ia pelo desenvolvimento da planície e da frente deltaica preferencialmente na plataforma (região proximal), enquanto que, no talude (região distal), desenvolver-se-iam frentes deltaicas e prodeltas. A subdivisão em tratos “aren ceo” e “heterol tico” obedece à característica petrográfica mais e ou menos argilosa dos arenitos desorganizados (fácies Ad e Am), resultante da natureza da fonte imediata dos sedimentos, oriundos da planície e frente deltaicas. A presença de argila (matriz) nas areias condiciona a evolução dos processos gravitacionais e, sobretudo, a eficiência de fluxos turbidíticos (cf. Mutti, 1992).

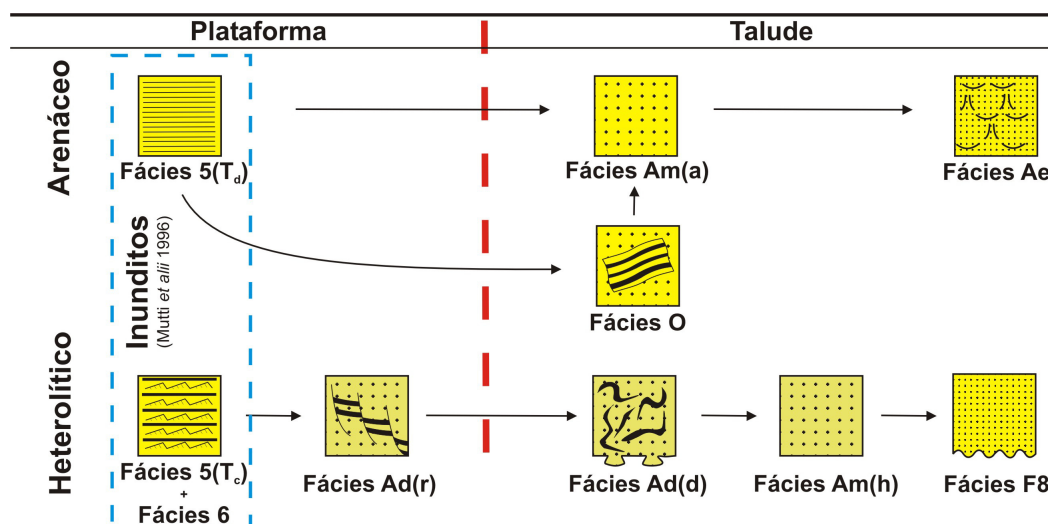


Figura 3 – Trato de fácies do tipo “plataforma–talude”, t pico do Membro Pitanga.

O primeiro trato, aren ceo, é composto pelas fácies 5(T ), O, Am(a) e Ae, e representa uma associação genética de fácies com uma fonte no delta essencialmente aren cea na frente deltaica, possivelmente uma barra de desembocadura de um canal principal ou distributário. O segundo trato, heterol tico é composto pelas fácies 5(T ), 6, Ad(r), Ad(d), Am(h) e F8, e representa fácies com origem em uma fonte heterolítica, ou seja, uma região com um maior aporte de sedimentos finos, possivelmente uma região de baía interdistribut ria.

Esta associação de fácies é típica do Membro Pitanga e pode apresentar padrão do tipo caixote ou serrilhado nas curvas de Raios-Gama (GR) e potencial espontâneo (SP), refletindo um padrão textural complexo. Em termos sismoestratigráficos, esperar-se-iam sismo fácies desorganizadas tais como caótica e *hummocky*.

5. Conclusão

O modelo deposicional apresentado levanta questionamentos sobre o contexto deposicional de águas lacustres profundas para muitas das fácies observadas, além do caráter de homogenitos sísmicos de muitas das fácies deformacionais. Sugere que a inundação fluvial e o excesso de carga de sedimentos acumulados em frente deltaica, instabilizados pela declividade de um talude – somado ou não a abalos sísmicos – tenha contribuído efetivamente para a acumulação dos arenitos que se constituem nas potenciais rochas-reservatório da Formação Maracangalha.

6. Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos à Agência Nacional do Petróleo (ANP), pelo apoio ao estudo através de seu Programa de Recursos Humanos em Geologia do Petróleo da UFRJ (PRH-ANP-18).

7. Referências bibliográficas

- CAIXETA, J.M. 1988. *Estudo faciológico e características de reservatório dos arenitos produtores de gás do Campo de Jacuípe (Cretáceo inferior) Bacia do Recôncavo-Brasil*. Ouro Preto, UFOP, 300p. (Dissertação de Mestrado)
- CAIXETA, J.M.; BUENO, G.V.; MAGNAVITA, L.P.; FEIJÓ, F.J. 1994. Bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá. *Bol. Geoci. PETROBRAS*, Rio de Janeiro, **8**:163–172.
- FIGUEIREDO, A.M.F.; BRAGA, J.A.E.; ZABALAGA, J.C.; OLIVEIRA, J.J.; AGUIAR, G.A.; SILVA, O.B.; MATO, L.F.; DANIEL, L.M.F.; MAGNAVITA, L.P.; BRUHN, C.H.L. 1994. Recôncavo Basin, Brazil: a prolific intracontinental rift basin. In: S.M. Landon (ed.) *Interior Rift Basins*. Tulsa, AAPG, p.157-203. (Memoir 59)
- GUERRA, G.S. 2002. *Fácies sedimentares dos membros Pitanga e Caruaçu da Formação Maracangalha (Cretáceo), bacia do Recôncavo*. Rio de Janeiro, IGeo/UFRJ, 72p. (Monografia de Graduação)
- MELLO, U.; DELLA FÁVERA, J.C.; KLEING, G.D. 1971. Processos gravitacionais subaquosos e rochas sedimentares na parte frontal de um delta cretáceo. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 25, São Paulo, *Anais*, **3**:159-177.
- MUTTI, E. 1992. *Turbidite sandstones*. Parma, Istituto de Geologia, Università di Parma, AGIP, 225p.
- MUTTI, E.; DAVOLI, G.; TINTERRI, R.; ZAVALA, C. 1996. The importance of ancient fluvio-deltaic systems dominated by catastrophic flooding in tectonically active basins. *Estratto da Memorie di Scienze Geologiche*, Padova, **48**:233-291.
- MUTTI, E.; TINTERRI, R.; REMACHA, E.; MAVILLA, N.; ANGELLA, S.; FAVA, L. 1999. *An introduction to the analysis of ancient turbidite basin from an outcrop perspective*. Tulsa, AAPG, 61p. + figs. (Continuing Education Course Note Series, 39)
- RAJA GABAGLIA, G.P. 1990. *Paleossismicidade e sedimentação – contribuição à geologia do compartimento Sul da bacia do Recôncavo – BA*. Rio de Janeiro, IGeo/UFRJ, 108p. (Dissertação de Mestrado)

Estampa I

Figura 1 – Fácies F5, praia de Bom Despacho, ilha de Itaparica. Observar a base irregular erosiva. / Figura 2 – Fácies F8, F9 e 5, praia de Bom Despacho, ilha de Itaparica. Observar o porte e a tabularidade das camadas de arenito. / Figura 3 – Fácies 5, praia de Bom Despacho, ilha de Itaparica. / Figura 4 – Fácies 5 e 6, Ponta da Sapoca, Salvador. / Figura 5 – Fácies Ad(d), ilha de Maré. Observar as laminações convolutas. / Figura 6 – Fácies Ad(r), ilha de Maré. Observar as microfalhas sinsedimentares. / Figura 7 – Fácies Am, ilha de Maré. Observar o bloco de arenito/lutito intraformacional, remanescente em uma “matriz” de arenito maciço. / Figura 8 – Fácies O, ilha de Maré. Observar o olistólito. / Figura 9 – Fácies Ae, ilha dos Frades. Observar as estruturas-em-pilar, deformadas. / Figura 10 – Fácies Lp, praia de Bom Despacho, ilha de Itaparica.

ESTAMPA I



Fig. 1

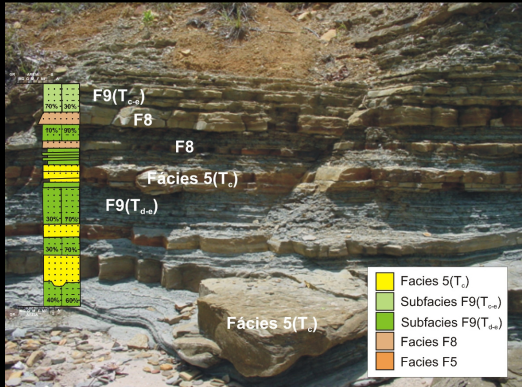


Fig. 2



Fig. 3



Fig. 4



Fig. 5



Fig. 6



Fig. 8



Fig. 7



Fig. 9



Fig. 10